

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

merenkulun koulutusohjelma / merenkulkualan insinöörin sv

Joni Uotila

Katsaus höyry- ja kaasuturbiinien laivakäyttöön

Opinnäytetyö 2012

## TIIVISTELMÄ

### KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

#### Merenkulun koulutusohjelma

Uotila, Joni	Katsaus höyry- ja kaasuturbiinien laivakäyttöön
Insinööri	43 sivua
Työn ohjaaja	Lehtori Ari Helle
Toimeksiantaja	Kymi Technology
Marraskuu 2012	
Avainsanat	höyryturbiinit, kaasuturbiinit, lämmön talteenotto, yhdistelmäkoneikot, dieselkoneet, ilmailu, voimalaitokset, laivakäytöt

Opinnäytetyössä käsitellään höyryturbiinien ja kaasuturbiinien käyttöä pääkoneena, apukoneena ja lämmön talteenotossa sekä yhdistelmäkoneikkoina. Työssä vertaillaan myös turbiineja dieselkoneisiin ja hieman voimalaitos- ja ilmailuratkaisuihin sekä valotetaan myös hieman turbiinien historiaa, nykyisyyttä ja tulevaisuutta laivakäytössä.

Työn on toteutettu, keräämällä materiaalia kirjoista, lehdistä ja Internetistä. Käytännön kokemusta työn tekijällä ei ole höyry- ja kaasuturbiineista, mutta teoriaan on pyritty perehtymään opinnäytetyön myötä.

Tutkielmassa on päädytty siihen, että höyry- ja kaasuturbiinin käyttö aluksilla ainoana pää- tai apukoneena nykyisillä polttoaineen hinnoilla ei ole taloudellisesti kannattavaa. Jos polttoaineen hinta laskee, on järkevää käyttää kaasu- ja höyryturbiinia aluksen pääkoneena. Taloudellisin ratkaisu tällä hetkellä on käyttää niitä yhdistelmäkoneikkoina. Pääkoneena käytetään esimerkiksi kaasuturbiinia ja sähkön tuottoon höyryturbiinia, joka toimii kaasuturbiinin pakokaasuilla kehitetyllä höyryllä.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Maritime Technology

Uotila, Joni

The Use of Steam and Gas Turbine in ship Propulsion

Bachelor's Thesis

43 pages

Supervisor

Helle Ari, Lecturer

Commissioned by

Kymi Technology

March 2012

Keywords

steam turbine, gas turbine, combined aggregates (combined cycles), diesel engine, aviation, power plant, marine use

This thesis describes the use of gas and steam turbines in ship propulsion. It compares the turbines with diesel engines and some power station and aviation solutions. Also, history, present situation and future of marine turbines are described.

This study was made by collecting material from books, magazines and internet. This thesis surveys the theory of steam and gas turbines.

In this thesis, the conclusion is that the use of steam and gas turbine in ship propulsion is not economically feasible with current fuel prices. If the price of the fuel falls, it makes sense to use the gas and steam turbine as the ship's main engine. The most economical solution at present is to use them in combination engines. Gas turbines are used as main engines and steam turbines as auxiliary engines which produce electricity from the gas turbine exhaust fumes.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO	5
2	HÖYRYTURBIINIT	6
2.1	Höyryturbiinien historiaa	6
2.2	Turbiinityypit	7
2.3	Käyttökohteet laivoilla	12
2.3.1	Turbogeneraattori	14
2.3.2	Propulsiomahdollisuuksia	14
2.4	Höyryturbiini ja dieselkoneistojen vertailu	15
2.5	Lämmön talteenotto	16
2.6	Ydinkäyttö	17
2.7	Ms Emma Maerskin pääkonejärjestelmän tiedot	19
2.8	Vaihtoehtoisia polttoaineita	20
2.9	Päästöt	20
3	KAASUTURBIINIT	21
3.1	Kaasuturbiinien historiaa	21
3.2	Kaasuturbiinityypit	21
3.3	Kaasuturbiinien toimintateoriaa	25
3.4	Kaasuturbiinit laivoilla	27
3.5	Kaasuturbiinin vertailua muihin koneisiin ja höyryturbiiniin	34
3.5.1	Kaasuturbiinien kulutuksen vertailu	34
3.5.2	Kaasuturbiinit voimalaitoksissa	37
3.5.3	Lämmöntalteenotto kaasuturbiinikäytössä	38
4	YHTEENVETO HÖYRY- JA KAASUTURBIINEISTA	40
4.1	Höyryturbiinit	40
4.2	Kaasuturbiinit	41
	LÄHTEET	42

## 1 JOHDANTO

Tässä työssä olen käsitellyt höyryturbiineja ja kaasuturbiineja ja niiden käyttöä aluksilla, eli minkä vuoksi kyseiset turbiinit on alkuaan otettu käyttöön, miksi niiden käyttö on vähentynyt ja suurimmaksi osaksi lopetettu sekä miksi niiden käyttö saattaa tulevaisuudessa jälleen lisääntyä.

Höyryturbiinia ja kaasuturbiinia on käytetty ja voidaan käyttää aluksien pääkoneina pyörittämään potkuria kuten myös apukoneina tuottamaan sähköä ja lämpöä. Kombiratkaisut yleistyvät eli kaasu- ja höyryturbiiniyhdistelmät keskenään tai muiden koneiden kanssa. Syynä tähän on turhan energiankulutuksen vähentäminen. Kaikki koneen teho ja lämpö pyritään käyttämään mahdollisimman hyvin hyödyksi ja vähentämään näin turhaa polttoaineen kulutusta. Eräs syy on myös se, että nykyään alkavat höyry- ja kaasuturbiinit olla tehohyötysuhteeltaan liki samanlaisia kuin dieselkoneetkin. Tämä mahdollistaa lähes yhtä pienen polttoainekulutuksen kuin dieselkoneilla. Yllä mainitut kombiratkaisut parantavat turbiinien tehohyötysuhdetta.

Syy miksi turbiineista luovuttiin lähes kokonaan oli se, että ne kuluttivat tehoonsa nähden enemmän polttoainetta kuin dieselmoottorit. 1970-luvulla alkaneen energiakriisin vuoksi bunkkerin (polttoaineen) hinta nousi. Tulevaisuudessa on taas tarvetta turbiineille nopeissa aluksissa ja joissakin jäänmurtoon kykenevissä rahtialuksissa ja jäänmurtajissa. Syynä on tehon tarve ja turbiinien polttoainekulutuksen pienentyminen kehityksen myötä sekä turbiinien ja dieselien tai sähkömoottoreiden yhteiskäyttö, niin että saadaan käytettyä energia tehokkaasti hyödyksi. Turbiinit myös nopeuttavat matkan tekoa esimerkiksi Koillisväylällä, joka on piakkoin sulamassa lähes kokonaan avoimeksi. Mitä nopeampia aluksia, sitä nopeammin ne pystyvät kuljettamaan lastia. Tehokkuus ja nopeus ovat tulevaisuudessa yhä enemmän päivän sana.

## 2 HÖYRYTURBIINIT

Höyryturbiini on lämpövoimakone, joka toimii kattilan tuottamalla höyryllä. Yksinkertaistettuna höyryturbiini toimii siten, että kattilassa poltetaan esimerkiksi raskasta polttoöljyä, josta syntyvä lämpö saa kattilan tuliputkissa olevan veden kiehumaan ja muodostamaan höyryä. Höyry tulistetaan ja ohjataan korkeapaineturbiiniin ja sieltä matalapaineturbiiniin, joka pyörittää joko generaattoria tai potkurin akselia.

### 2.1 Höyryturbiinien historiaa

1800-luvun lopulla ja 1900-luvun alussa Atlantin liikenteen kauppalaivoissa sekä sota-aluksissa tarvittiin suurempia nopeuksia. Mäntämoottoriset höyrykoneet, joilla suurempiin nopeuksiin pyrittiin vaativat laivoissa liikaa tilaa ja painoivat paljon. Suuremman nopeuden saavuttamiseksi vaadittiin useampia moottoreita, mutta niiden aiheuttamaa tärinää oli vaikea hallita. Koska vaadittiin enemmän tehoa pienemmässä tilassa, alettiin kehittää höyryturbiineja. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot, s. 2.)

Ensimmäisen toimivan höyryturbiinin rakensi deLaval vuonna 1883. Parson kehitti vuotta myöhemmin höyryturbiinin, joka soveltui laivakäyttöön. Vuonna 1897 asennettiin höyryturbiini Turbiniaan, joka oli ensimmäinen höyryturbiinikäyttöinen alus. (Wikipedia)

Turbiinien haittana oli kuitenkin niiden korkea kierrosluku, koska alennusvaihteita ei ollut vielä keksitty. Ongelma oli myös se, että akselin pyörimissuuntaa ei voitu vaihtaa ja tarvittiin toinen turbiini takaperin ajoa varten.

Vasta tehokkaiden laivavaihteiden ja korkeapainekattiloiden kehitys mahdollisti turbiinien pysyvän läpilyönnin laivakäytössä. Näillä saavutettiin yhdessä erittäin suuri teho ja niillä oli vähäisempi tehopaino kuin höyrykoneilla tai vastaavilla dieselkoneilla ja niiden tilantarve oli pienempi. Yhdistelmää käytettiin ennen toista maailmansotaa suurissa, nopeissa rahtilaivoissa ja 1950-luvulta alkaen myös suurissa tankkereissa sekä supertankkereissa ja vuodesta 1967 suurissa konttialuksissa. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 3.)

Turbiineilla oli kuitenkin huono hyötysuhde dieselmoottoreihin verrattuna, mutta ne olivat erittäin luotettavia. Niiden huoltoväli oli pitkä ja huoltokulut alhaiset. Suuri

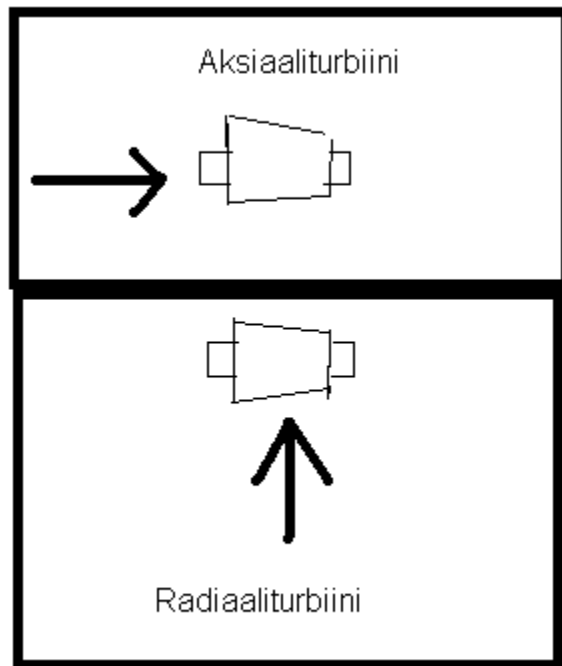
polttoaineen kulutus ei merkinnyt paljoakaan, koska öljyn hinta oli alhainen. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 92-93.)

Vuonna 1973 öljykriisi muutti kuitenkin tilanteen raskaan bunkkeriöljyn kallistuessa voimakkaasti lyhyessä ajassa. Tästä johtuen höyryturbiinien käytöstä alettiin luopua, koska niiden käyttö pienemmällä teholla polttoaineen säästämiseksi heikensi niiden hyötysuhdetta entisestään. Tämän vuoksi höyryturbiinien vaihtoehdoksi muodostuivat dieselmoottorit, joiden tekniikka oli kehittynyt ja ne voivat käyttää myös raskasta polttoöljyä. Nykyään höyryturbiineja käytetään lähinnä nopeissa laivastoaluksissa. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 3).

## 2.2 Turbiinityypit

Höyryturbiinit voidaan jaotella eri toimintojen perusteella, kuten höyryn virtaussunnan, entalpian hyötykäytön mukaan, väliottojen ja juoksujen määrän mukaan; eli yksi ja sama turbiini voi kuulua useamman eri jaottelualueen piiriin. Tärkein ajatus on kuitenkin se, että turbiinille tuleva höyryn paine muutetaan virtausnopeudeksi johtolaitteissa ja näin ollen virtausenergialla juoksusiivistössä saadaan akseliin vääntömomentti, eli akseli alkaa pyöriä. (Huhtinen ym. 2008, Voimalaitostekniikka s. 109.)

Ensimmäiseksi voidaan jaotella turbiinit aksiaaliturbiineihin ja radiaaliturbiineihin eli sen mukaan, miten höyry virtaa turbiiniin. Aksiaaliturbiinissa höyry virtaa turbiinissa akselin suuntaisesti, radiaaliturbiinissa höyry virtaa taas akselia kohti.



Kuva 1. Höyryn virtaussuunnan erot aksiaali- ja radiaaliturbiinissa.

Seuraava jaottelu liittyy siihen, kuinka paljon saadaan käytettyä turbiiniin tuodusta energiasisällöstä hyödyksi eli akselitehoksi.

Lauhdeturbiinissa tavoitellaan mahdollisimman suurta akselitehon saantia höyryn entalpiasta. Lauhdeturbiineja käytetään lähinnä sähköntuotantoon suuren akselitehon takia. Lauhdeturbiinin heikkous on huono hyötysuhde, sillä 60 % turbiiniin tuodusta lämmöstä katoaa jäähdytysveden mukana.

Vastapaineturbiinissa käytetään vain osa höyrystä akselitehoksi ja loput höyryt käytetään ylipaineisena prosessin tai kaukolämpöverkon veden lämmittämiseen. Tätä rakennetta käytetään silloin, kun tarvitaan paljon lämmöntuotantoa ja hieman sähköntuotantoa. Vastapaineturbiinin hyötysuhde on lauhdeturbiinia parempi, koska voidaan käyttää paremmin hyödyksi lämpöä ja sähköä.

Kummassakin yllä mainitussa turbiinissa on väliottoja, joissa otetaan jaksojen välistä korkeapaineista entalpiaa sisältävää höyryä laitoksen omiin tarpeisiin tai lämmittämään esimerkiksi syöttövetä höyryä tuottavalle laitokselle, koska tämä nostaa kokonaishyötysuhdetta.

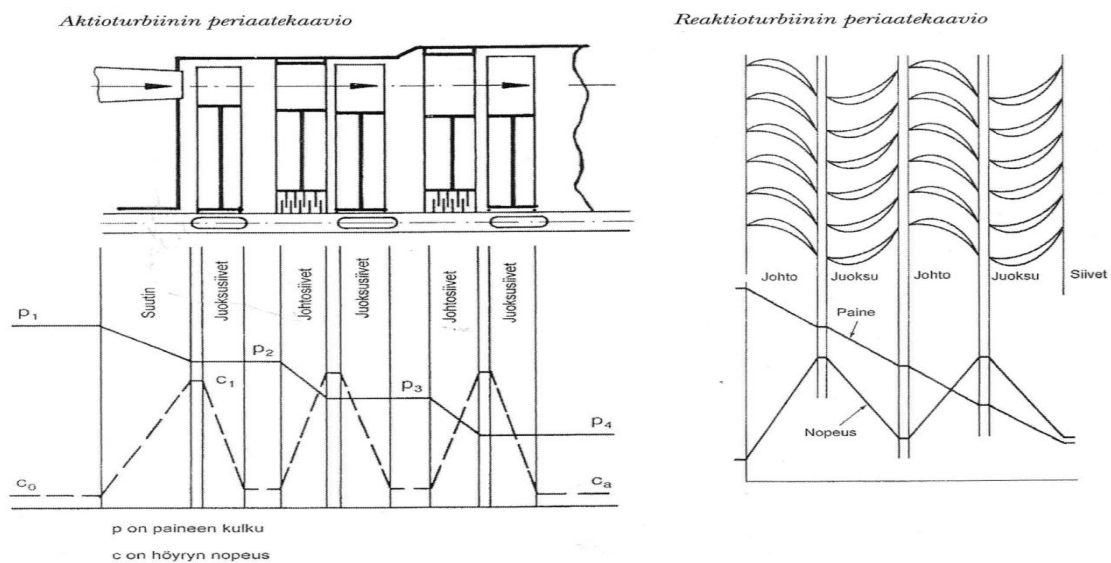


Kolmas turbiinien jaottelu liittyy rakenteeseen. Siinä turbiinit jaotellaan tasapaine- eli aktioturbiineihin ja ylipaine- eli reaktioturbiineihin.

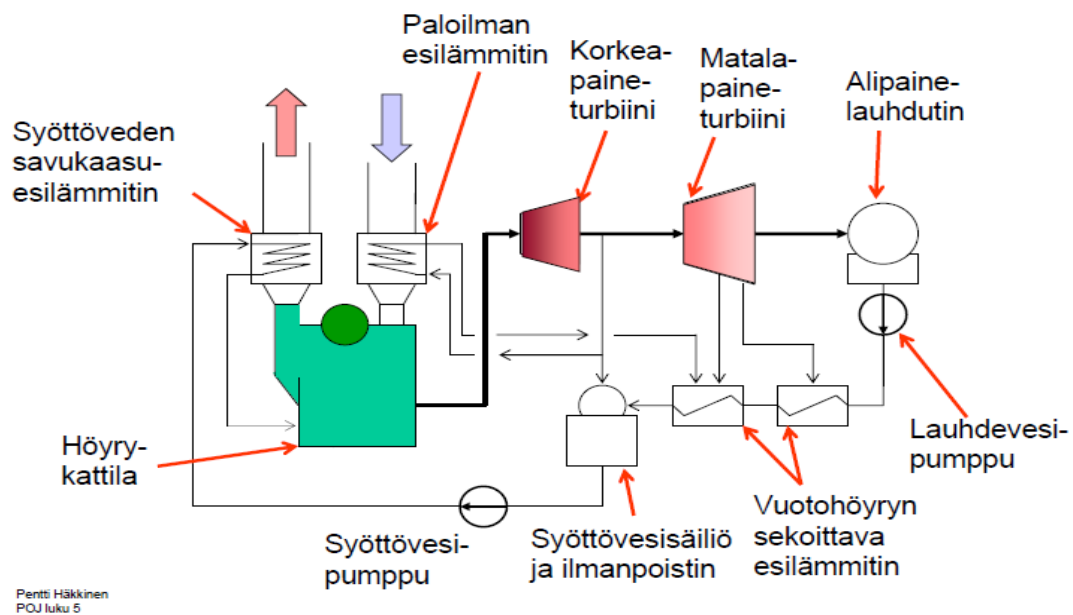
Tasapaineturbiinissa höyryn entalpia muutetaan virtausenergiaksi juoksujen johtosivissä, jolloin saadaan aikaiseksi suuri virtausnopeus, mutta pienempi paine. Juoksusivissä otetaan virtausnopeus talteen höyryn kulkiessa läpi siivistön vakiopaineisena, minkä vuoksi sitä kutsutaan tasapaineturbiiniksi. Rakenteellisesti tasapaineturbiini on ratkaistu kiinnittämällä kiinteät johtosivistöt turbiinin kotelon reunoihin ja tiivistäen akselin läpiviennit. Näin on luotu eräänlaisia kammioita juoksusiipien väliin, joissa on koko ajan vakiopaine. Juoksusiivet taas on kiinnitetty akselille, jolloin niiden kohtaama virtausnopeus aiheuttaa energian muutoksen akselin vääntömomentiksi- sama prosessi toteutetaan turbiinin jokaisessa jaksossa. Kammiorakenteensa johdosta tasapaineturbiinia voidaan myös kutsua kammioturbiiniksi.

Ylipaineturbiineissa entalpia käytetään hyödyksi muuttamalla painetta virtausnopeudeksi johtosivistön lisäksi myös juoksusivistössä. Tällöin akselin vääntömomenttia kehittävä juoksupyörän kehävoima muodostuu höyrysuihkun nopeuden kasvusta reaktioasteen mukaisesti. Juoksupyörästä siivet on kiinnitetty ylipaineturbiinissa rumpumaiseen akseliin, josta ylipaineturbiinille tulee nimitys rumputurbiini. Johtosivistö on kiinnitetty turbiinin koteloon ja siipien päihin sekä tiivistetty akselille sokkelotiivistein.

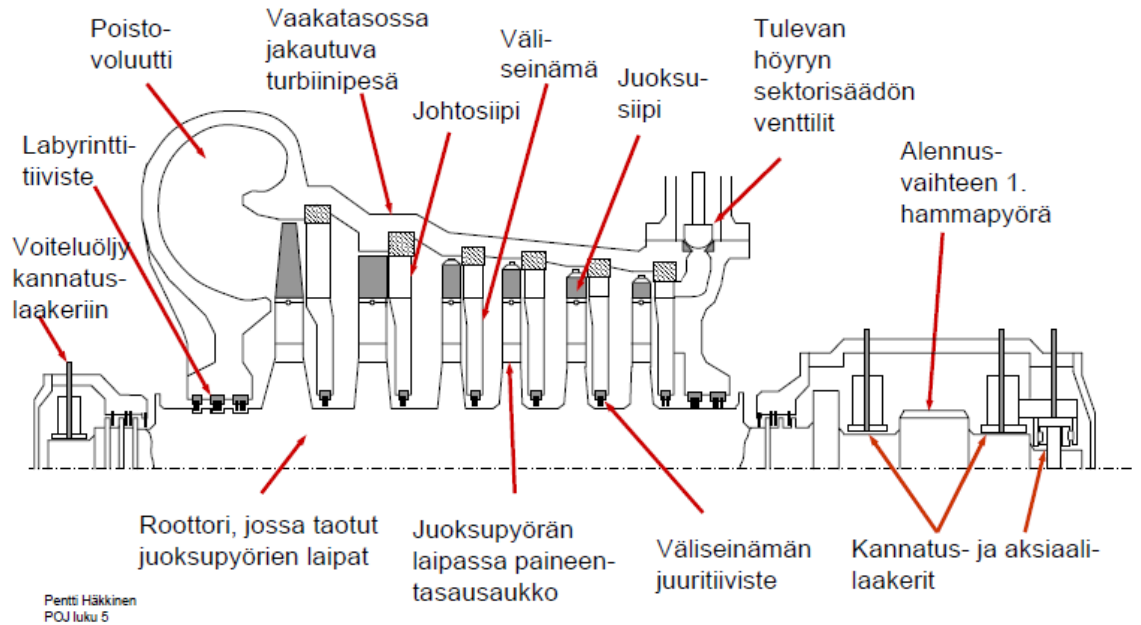
(Huhtinen ym. 2008, Voimalaitostekniikka s. 109.)



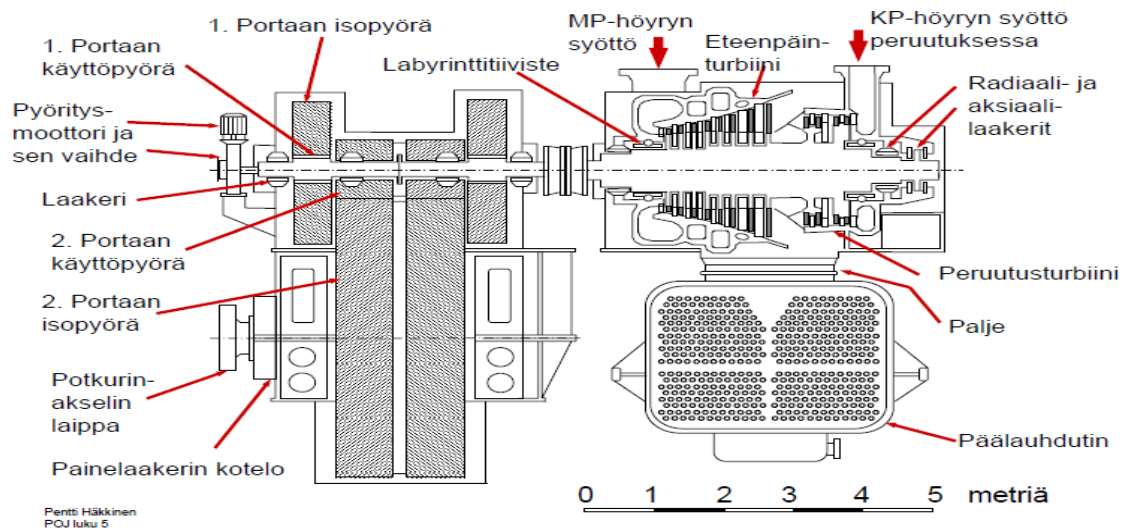
Kuva 2. Tasapaine- ja ylipaineturbiinista havainnekuva (Huhtinen ym. 2008, Voimalaitostekniikka s. 111).



Kuva 3. Tyypillinen höyryturbiinikoneisto (Häkkinen, P. Turbiinikoneistot).

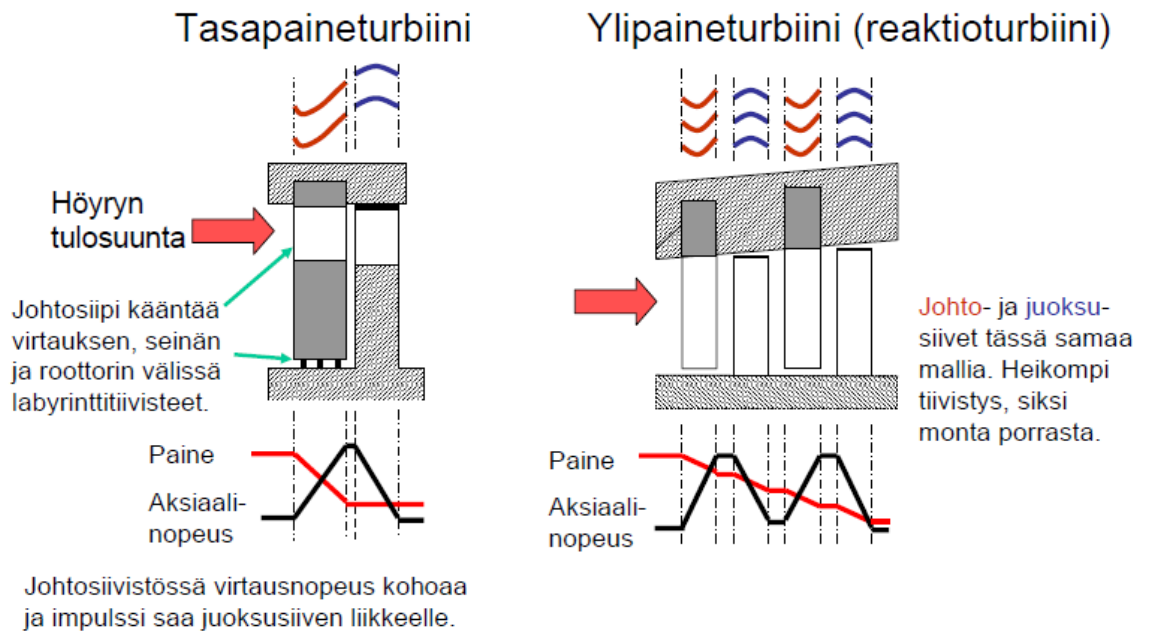


Kuva 4. Korkeapaineturbiinin halkileikkaus (Häkkinen 2007, Laivan koneistot, s. 95).



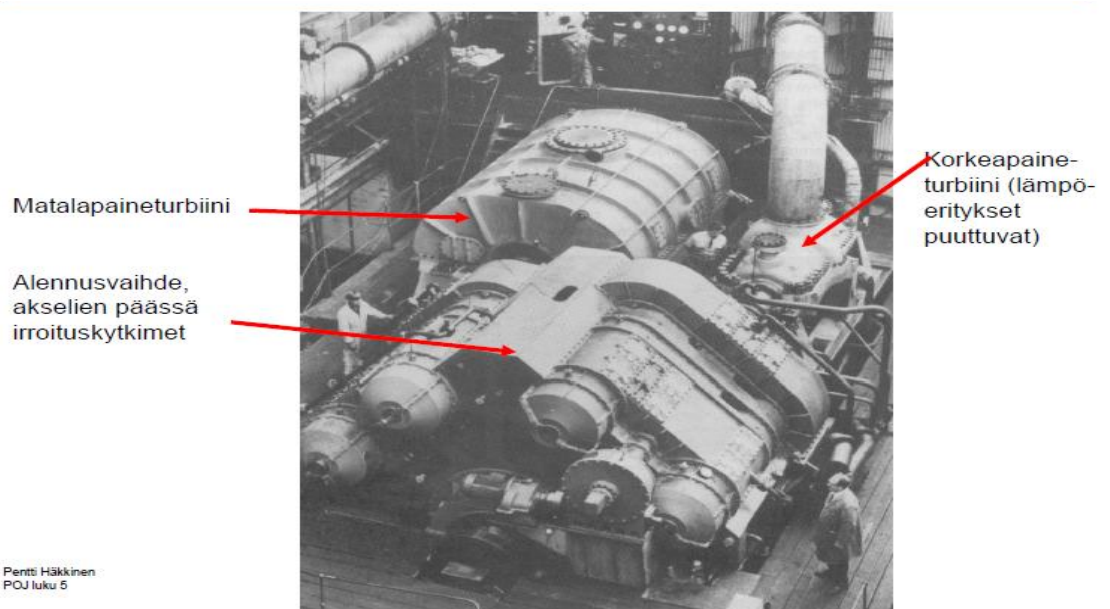
Kuva 5. Matalapaineturbiini, lauhdutin ja alennusvaihde. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 96).

Höyryvirta kohtaa joka portaassa ensin runkoon kiinnitetyn kiinteän **johtosiiven** ja sen jälkeen roottoriin kiinnitetyt pyörivän **juoksusiiven**.



Kuva 6. Turbiinisiivistöt: Tasapaine- ja ylipaineturbiini (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 94).

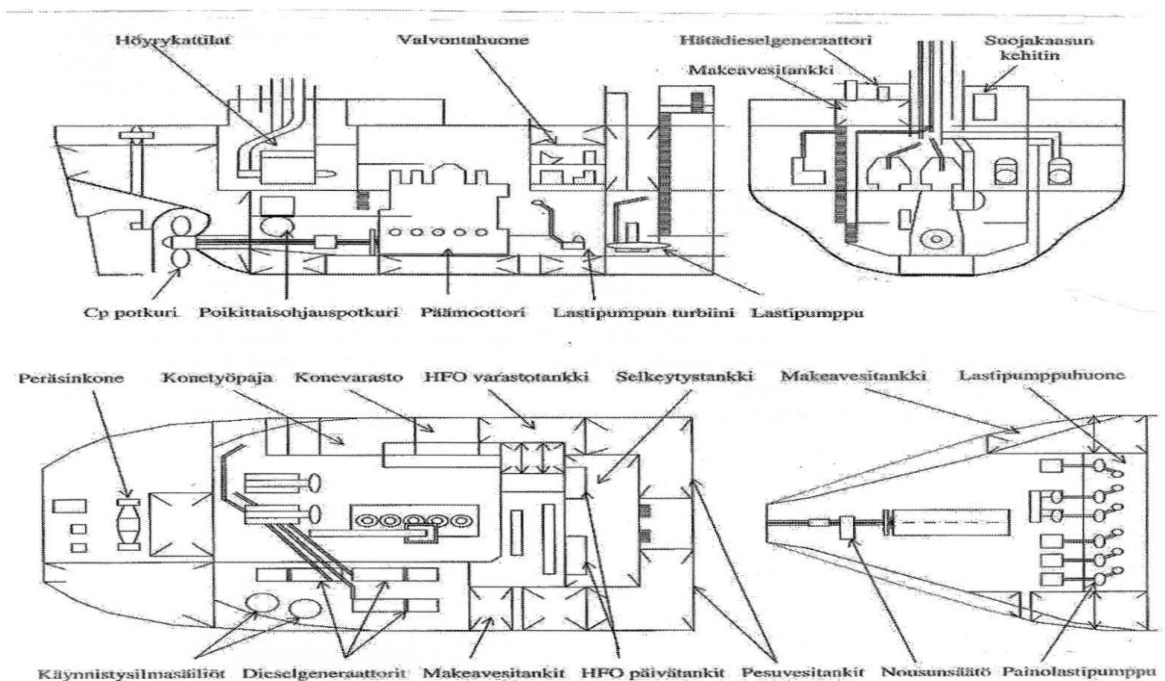
### 2.3 Käyttökohteet laivoilla



Kuva 7. Queen Elizabeth 2:n höyryturbiiniyksikkö 1950-luvulta (Häkkinen, P. Turbiinikoneistot).

Vuonna 1897 Charles Parsons patentoi laivakäyttöön soveltuvan höyryturbiinin. 1970-luvulla suuritehoisissa laivoissa oli höyryturbiini pääkoneena dieselkoneiden ollessa vielä lastenkengissä. Höyryturbiinialuksissa käytettiin polttoaineena yleensä halvinta mahdollista eli raskasta polttoöljyä, mutta esimerkiksi kaasualuksissa käytettiin lastia polttoaineena. Ydinkäyttöisissä murtajissa ja lentotukialuksissa käytettiin polttoaineena plutoniumia, jonka vaihtoväli on viisi vuotta. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot, s. 9).

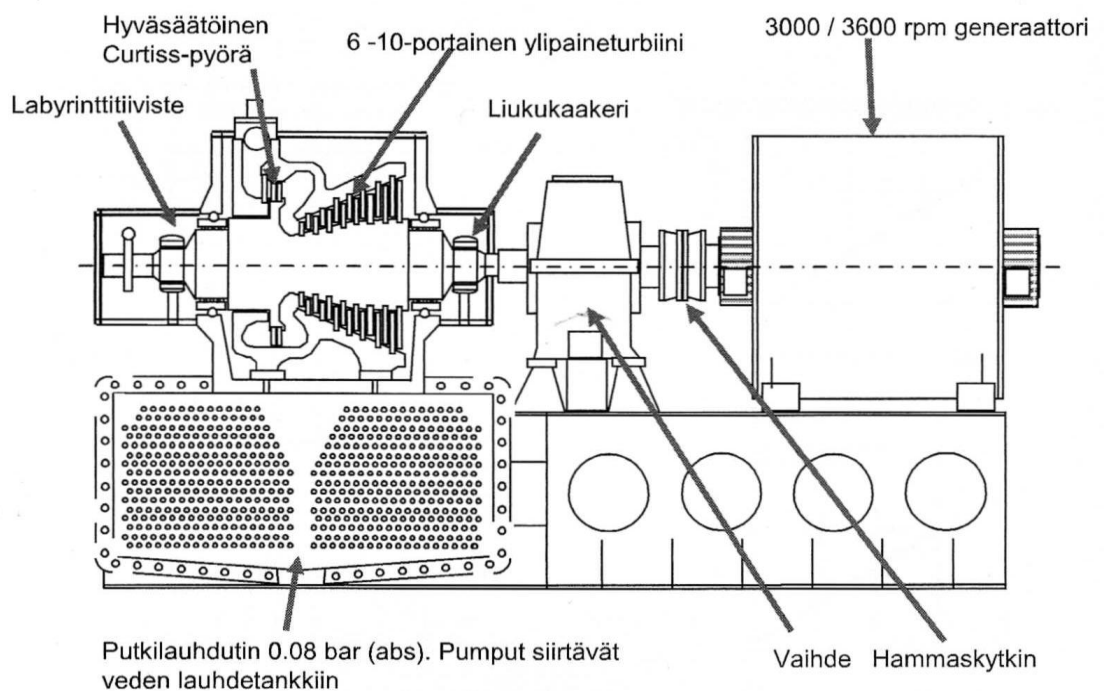
Öljytankkereissa käytetään höyryturbiinia lastipumpun pyörittämiseen. Höyryturbiinin etuna on helppo pyörimisnopeuden säätö ja haittana huono hyötysuhde (alle 22 %). Raakaöljy ja raskaat tuotteet vaativat lastinlämmitystä varten kaksi tehokasta kattilaa, joiden kummankin tyypillinen tuotto on 15 ... 30 t/h. Höyryturbiinikäyttöiset pumput ovat luonteva ratkaisu, koska pumppausteho ei vaadi investointia erillisiin höyrykattiloihin. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot, s. 2.)



Kuva 8. 48 000 TDW:n raakaöljysäiliöalus MT Tervin koneisto (Häkkinen 2007, Laivan koneistot, s. 20).

### 2.3.1 Turbogeneraattori

Turbogeneraattorilla tuotetun sähkön hinta sisältää vain huolto- ja pääomakulut. Normaalisti turbogeneraattorin turbiini on ylipaineturbiini, jossa on 6-10 vyöhykettä ja se pyörii 6000-9000 r/min. Turbiinin alustaan kuuluu itse turbiini, alennusvaihde, generaattori ja lauhdutin. Seuraavassa kuvassa oleva turbogeneraattori vaatii moottorin pakokaasuilta 70 000 kg/h massavirran ja 370 asteen lämpötilan ennen kattilaa. Tällaisen pakokaasumäärän saa aikaan jo 11 MW:n tehoinen dieselmotori maksimaalisella tehollaan. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot, s. 133.)

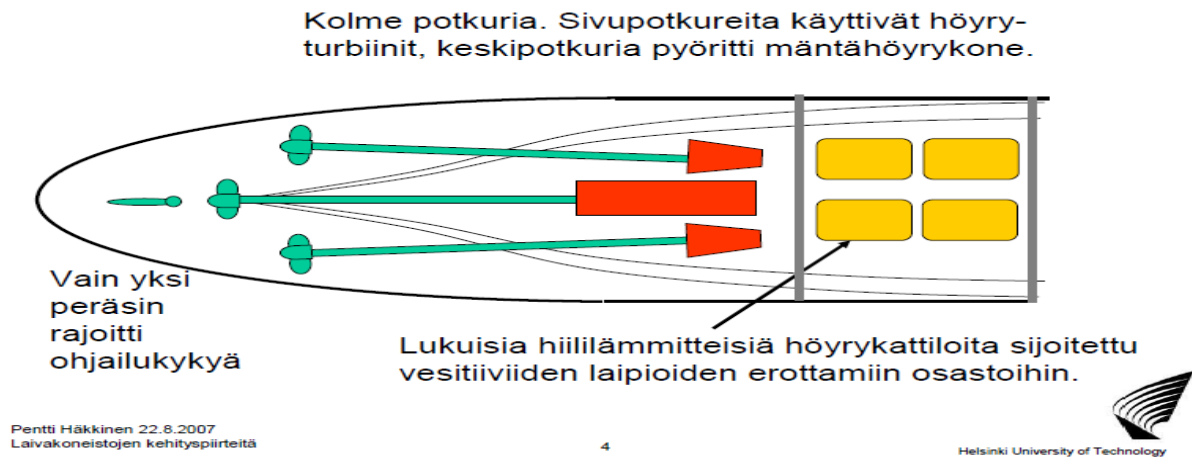


Kuva 9. Lämpileikkaus 600 kW:n turbogeneraattoriyksiköstä lauhduttimiseen. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 133).

### 2.3.2 Propulsiomahdollisuuksia

Esimerkiksi Lenin-jäänmurtaajassa reaktorit käyttivät neljää höyryturbiinia. Nämä pyörittivät sähkögeneraattoreita, jotka tuottivat virtaa aluksen sähkömoottoreille. Vuonna 2018 venäläiset ottavat käyttöön maailman tehokkaimman Projekt 22220-jäänmurtaajan. Aluksessa on 2 kpl 55 MW:n RITM-ydinreaktoria, joista saadaan 110 MW yhteistehoa. Aluksen reaktorit ovat painevesireaktoreita ja käyttävät 20-prosenttisesti rikastettua uraani-235:ta polttoaineena. Polttoainetäydennys on seitse-

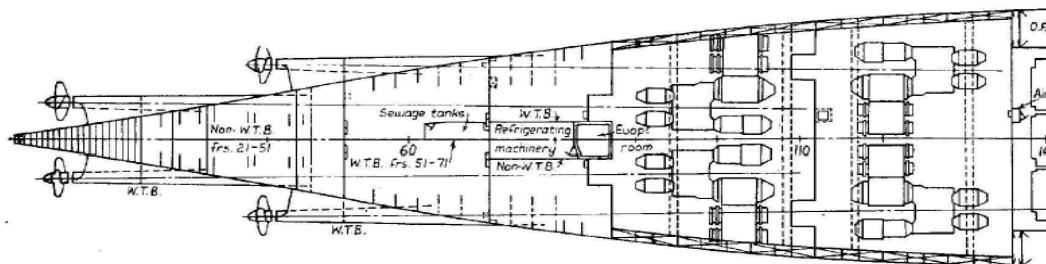
män vuoden välein. Reaktori tuottaa höyryä generaattoria pyörittäville turbiineille, jotka puolestaan tuottavat sähköä aluksen potkurin sähkömoottoreille. (Projekt 22220-jäänmurtajan RITM- ydinreaktoriin : The Ux Consulting Company, Tieteen Kuvalehti nro 16/2012 s.38, Turunen & Partanen 2011, Raakaa voimaa s. 99).



Kuva 10. Titanic-luokan alus, jossa höyry tuotetaan kattiloilla ja johdetaan suoraan höyryturbiineille, jotka pyörittävät potkuria (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 4).

Kokonaisteho 180000 shp, 4 identtistä höyryturbiinia, alennusvaihteet

Propulsiokoneisto jaettu keula- ja perähuoneisiin



Osastojen välillä täysikorkeat poikittaislaipiot. Kaksoislaidat molempien turbiinihuoneiden ja 5 kattilahuoneen matkalla.

Pentti Häkkinen 22.8.2007  
Laivakoneistojen kehityspiirteitä

7

Helsinki University of Technology

Kuva 11. R.M.S Queen Maryn höyryturbiinien kytkentä alennusvaihteen avulla potkurin akseleihin (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 7).

## 2.4 Höyryturbiini ja dieselkoneistojen vertailu

Höyryturbiinilla on huonompi hyötysuhde kuin dieselkoneella, koska korkeammat prosessipaineet ja höyrynkierro verottavat osansa hyötysuhteesta. Dieselkoneella on 43-50 %:n hyötysuhde, kun höyryturbiinilla hyötysuhde on vain 35-38 %. Yli 50 MW:n höyryturbiinilla saataisiin parempi hyötysuhde, mutta sellaisia on laivoissa todella harvoin. Höyryturbiinia voidaan käyttää heikompileaattisillakin polttoaineilla

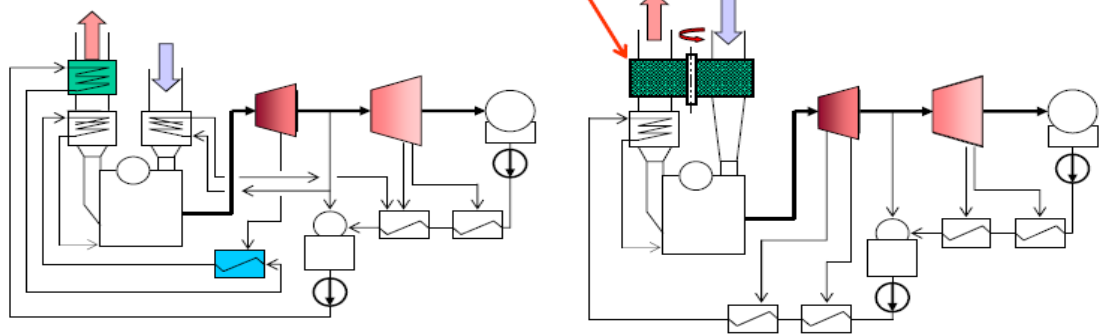


kuin raskaspolttoöljy, kuten turve, hiili, biomassa ja kaupunkijäte, mutta laivoilla käytetään höyryturbiinin höyryn tuottamiseen polttoaineena raskasta polttoöljyä tai kaasua. Höyryturbiinin apukojeeet ovat yksinkertaisia, sen käyttö on helppoa ja se on melko lailla huoltovapaampi kuin dieselkoneet. Dieselkoneet ovat pienempiä ja niiden kulutus on vähäisempää kuin höyryturbiineilla. Jotta saadaan tarpeeksi höyrynpainetta turbiinien pyörittämisen, tarvitaan suuret kattilat, jotka kuluttavat paljon polttoainetta. Kooltaan laitteet ovat isoja ja painavia. Höyryturbiinia käytetään hyödyksi lähinnä LNG- tankkereissa sekä ydinkäyttöisissä murtajissa ja sotalaivoissa. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 92.)

## 2.5 Lämmön talteenotto

Esilämmittimien määrää lisäämällä parannetaan hyötysuhdetta. Edelliseen verrattuna tässä on kaksi savukaasu-esilämmitintä ja lisäksi sekoittava esilämmitin niiden välissä.

Pyörivä Ljungström-tyyppinen esilämmitin-kenno on suosittu. Sen ongelmana on nopea syöpyminen (matala lämpötila, rikin oksidit).

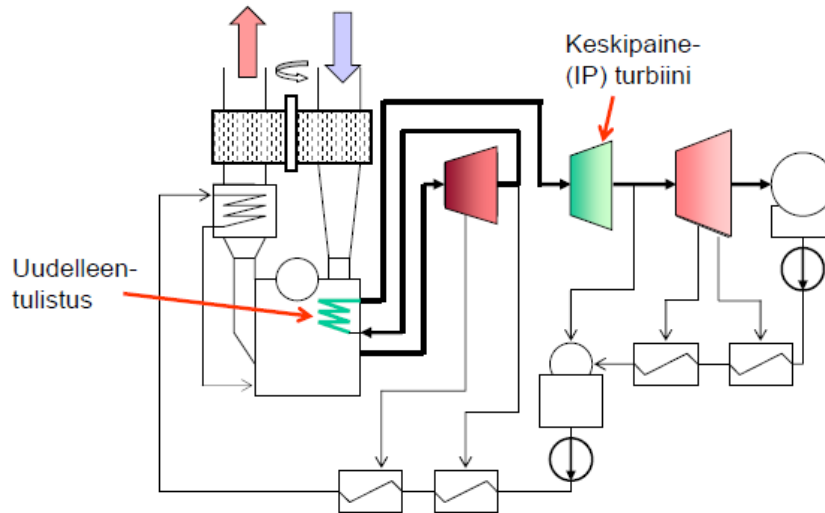


Pentti Häkkinen  
POJ luku 5

Kuva 12. Turbiinikoneistojen lämmöntalteenottomahdollisuuksia (Häkkinen 2007, Laivan koneistot, s. 91).



Reheat-koneistossa on lisäksi keskipaineturbiini. Höry palaa korkeapaineturbiinin jälkeen kattilaan uudellentulostettavaksi.



Monta lämmönvaihdinta.

Pentti Häkkinen  
POJ luku 5

Ensimmäiset asennukset LNG-laivoihin 2000-luvulla. Yleisemmin käytössä maavoimaloissa joissa on ns. leijupetikattilat huonolaatuiselle polttoaineelle.

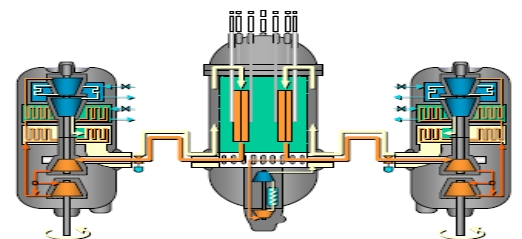
Kuva 13. Välitulistus turbiinikoneistossa (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 91).

## 2.6 Ydinkäyttö

Ydinreaktorilla tuotetulla lämmöllä kiehutetaan vettä niin, että siitä muodostuu paineista höyryä, jolla pyöritetään höyryturbiinia. Höyryturbiini pyörittää sähköä tuottavaa generaattoria tai potkurinakselia aluksen liikuttamiseksi.

Ydinkoneisto sisältää melko tavanomaisen höyryturbiinikoneiston. Lämpötilat ovat matalat, jotta vältetään uraanipolttoaineen sulaminen. Rakennettu alle 10 ydinkäyttöistä (koe-) alusta, satoja sota-aluksia. Länsimaisille aluksille ei ole sattunut onnettomuuksia. Reaktori on melko pienikokoinen. Paine- ja säteilysuojaus kasvattavat mittoja ja massaa. Maavoimaloissa uusinta reaktoritekniikkaa voidaan soveltaa laivoihin. Ydinkoneisto soveltuu alukseen, jolta halutaan pitkä toimintasäde. Polaarimurtajat ja arktiset rahtilaivat. Merkittävä ongelma yleinen mielipide. 'Tuskin päästetään satamaan.'

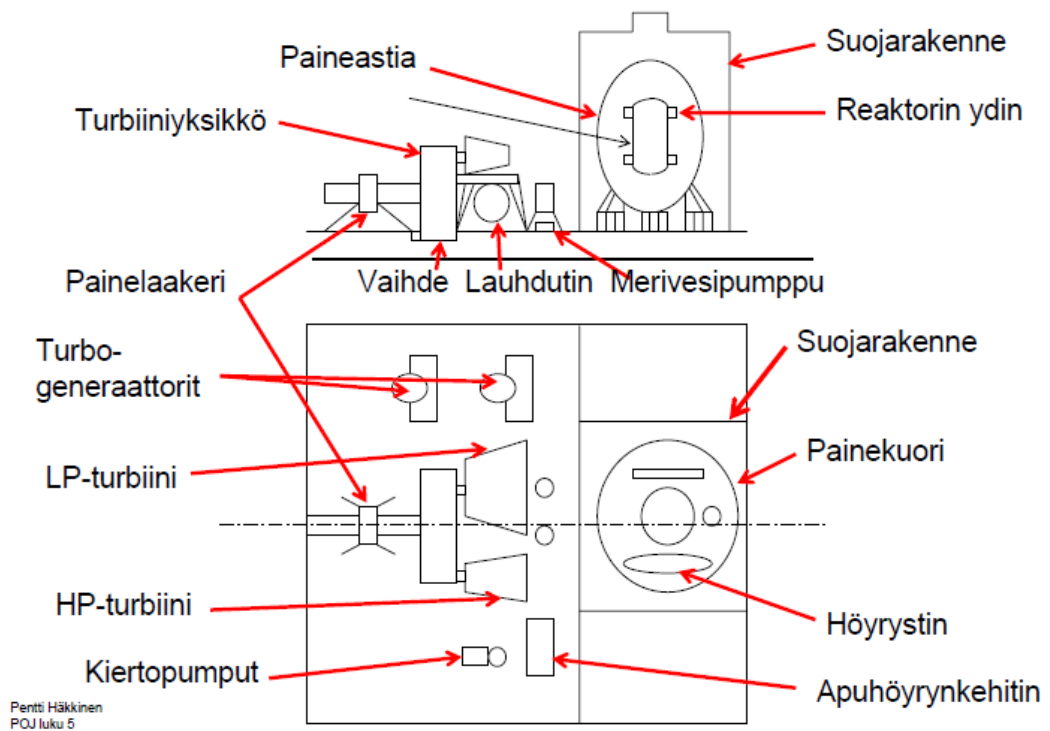
Pentti Häkkinen  
POJ luku 5



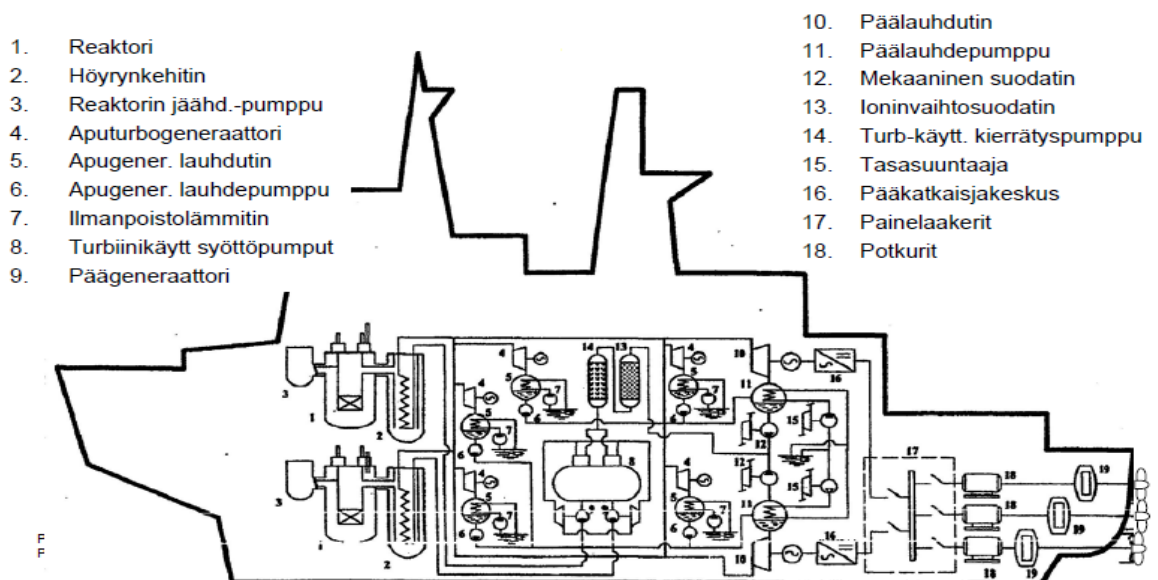
Keskellä reaktori, sen molemmin puolin kuorirakenteisiin sijoitetut turbiiniyksiköt.

Koneisto kallis rakentaa, koska turvallisuusmääräykset ja tarkastukset tiukkoja. Rakentamisaika paljon (kaksi vuotta) tavanomaista laivaa pitempi.

Kuva 14. Laivan ydinreaktorikoneisto (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 103).



Kuva 15. Ydinreaktorikoneisto (Häkkinen 2007 Laivan koneistot , s. 104).



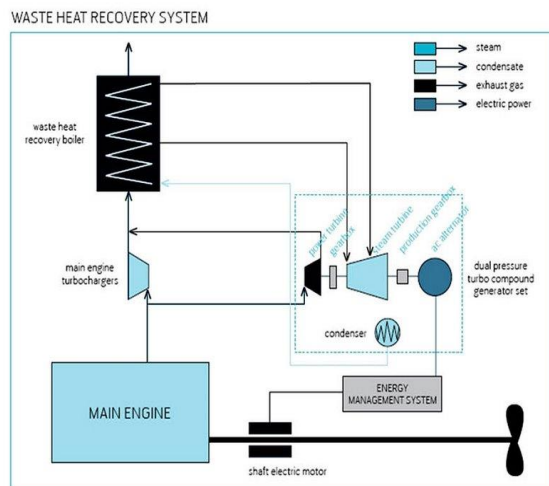
Kuva 16. Neuvostoliitossa rakennetun 3-potkurisen jäänmurttajan reaktorikoneiston kaavio (Häkkinen, P. Turbiinikoneistot).

## 2.7 Ms Emma Maerskin pääkonejärjestelmän tiedot

Aluksen voimanlähteenä on Wärtsilä Sulzer RTA96-C, 14-sylinterinen dieselmoottori, joka on suurin yksittäinen diesel-yksikkö maailmassa. 2300 t painoisen moottorin maksimiteho on 108920 hv (81 221 kW), 102 rpm ja suurin vääntömomentti on (7.497.134 Nm/ 102 r/min). Moottorin mitat ovat 27,12 m pituus ja 13.41 m korkeus. Jokainen sylinteri tuottaa 7780 hv eli 5720 KW. Kokonaisiskutilavuus on 14 sylinterillä 25 480 litraa.

Pääakselille voidaan myös kytkeä kaksi sähköistä lisäkäyttöä eli akselimoottoria. Akselimoottorit ovat kokonaisteholtaan 18 000 kW ja generaattorit ovat Caterpillar 8M32. Kummastakin generaattorista saadaan 5880 kW tehoa. Pakokaasugeneraattorilla saadaan 8000 kW tehoa.

Pääkoneen hyötysuhde on yli 50 %, mikä on laivakäytössä korkea. Se käyttää raskasta polttoöljyä 14 380 litraa tunnissa. Täydellä teholla polttoainetta kuluu 0,171 litraa/kWh, eli 14 200 litraa tunnissa. (Wartsila Sulzer RTA96-C/Engine)



Emma Maersk - super size diesel engine  
(check out the technician center above!)

Kuva 17. Emma Maerskin kone. Koneen pakokaasut käytetään hyödyksi pakokaasukattilassa, eli tuotetaan höyryä. Tämä höyry syötetään höyryturbiinille, joka pyörittää turbogeneraattoria, josta teho siirretään energiankäsittelyjärjestelmään ja akselimoottorille. Näin energiaa kierrättämällä säästetään polttoainetta.

([www.thegreenenergrass.org/2008/01/interview](http://www.thegreenenergrass.org/2008/01/interview)).

Aluksella alennetaan ympäristökuormitusta ottamalla pakokaasusta lämpö talteen ja hyödyntämällä yhteistuotantoa. Osa pakokaasuista palautetaan koneeseen luomaan taloudellisuutta ja alentamaan päästöjä ja osa pakokaasuista johdetaan höyrygeneraattoriin, joka pyörittää höyryturbiinia ja sähkögeneraattoria tuottaakseen sähköä. Tästä syntyy 8,5 MW:n sähköteho, joka on 12 % pääkoneen tehosta. Osa höyrystä käytetään aluksen lämmittämiseen. Viisi dieselgeneraattoria tuottavat yhteensä 20,8 MW sähkötehoa ja kaksi sähkömoottoria antaa lisätehoa potkurinakselille.

## 2.8 Vaihtoehtoisia polttoaineita

Höyryä voidaan tuottaa höyryturbiineille aurinkoenergialla, polttamalla höyrykattilassa fossiilisia polttoaineita, turvetta, hiiltä, raskasta polttoainetta, dieseliä, biomassaa, kaupunkijätettä tai ydinreaktorilla (Huhtinen ym. 2008, Voimalaitostekniikka s. 35, 92, 295, 233).

## 2.9 Päästöt

Höyryturbiinin käyttö aiheuttaa rikkipäästöjä, jotka johtuvat kattilassa poltettavasta polttoaineesta, kuten hfo (raskas polttoöljy). Rikkioksidit ja typenoksidit ovat luonnolle myrkyllisiä, joten niiden takia yritetään siirtyä vähärikkiseen polttoöljyyn, joka on puolestaan kalliimpaa. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 93.)

Rikkiä yritetään poistaa pakokaasuista pesureilla, mikä on kallista ja siitä on vielä vähän kokemuksia. Valtamerillä pakokaasuja yritetään pestä merivedellä, joka suihkitaan pieninä pisaroina pakokaasuihin. Itämerellä pakokaasuja pyritään puhdistamaan NaOH:lla (lipeällä) tai urealla. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 130.)

### 3 KAASUTURBIINIT

Kaasuturbiini on lämpövoimakone. Kaasuturbiinin kompressorin imee ulkoa tulevaa ilmaa ja painaa sen turbiinin läpi, jonka palotilassa polttoaine syttyy. Tällöin syntyy pakokaasuja, jotka pyörittävät turbiinin akselia tuottaen pyöriessään sähköä tai pyörittäen akselin välityksellä aluksen potkureita. Kaasuturbiinin pakokaasuista tulevaa lämpöä voidaan käyttää hyväksi ja sillä voidaan lämmittää mm. pakokaasukattilaa. (Huhtinen ym. 2008, Voimalaitostekniikka s. 204.)

#### 3.1 Kaasuturbiinien historiaa

Vuonna 1872 F. Stolze rakensi ensimmäisen kaasuturbiinimoottorin. Aegidius Elling rakensi kaasuturbiinin vuonna 1903. Vuonna 1914 Charles Curtis patentoi kaasuturbiinin. General Electric perusti kaasuturbiiniosaston vuonna 1918. Frank patentoi kaasuturbiinin lentokäyttöön vuonna 1930. Vuonna 1947 Iso-Britanniaan hankittiin kaasuturbiinikäyttöinen sotalaiva Motor Gun Boat 2009. (Wikipedia.)

Sähköntuotannossa kaasuturbiineita on käytetty 1950-luvulta lähtien. Kaasuturbiinilaitokset ovat viime vuosikymmeninä olleet eniten rakennettu tyyppi sähköntuotantoon. GTS FINNJET oli valmistuessaan vuonna 1977 maailman ensimmäinen kaasuturbiineita käyttävä matkustaja-autolautta. Laivan moottorit olivat muunneltuja versioita Douglas DC-8-lentokoneissa käytetyistä moottoreista. Finnjetissä oli kaksi Pratt & Whitney FT4C-1 DLF-kaasuturbiinia. (Häkkinen, Pentti 2007, Laivan koneistot s. 100; Huhtinen ym. 2008, Voimalaitostekniikka s. 204.)

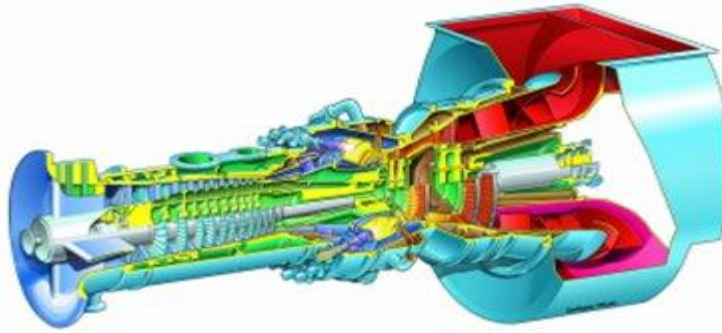
#### 3.2 Kaasuturbiinityypit

Kaasuturbiinit voidaan rakenteensa ja suunnittelufilosofiansa perusteella jakaa kolmeen ryhmään.

##### 1) Teollisuuskaasuturbiinit

Nämä turbiinit on mitoitettu kombi- ja kaasutuskombivoimalaitoskäyttöä silmällä pitäen isoihin voimalaitoksiin eikä niitä käsitellä tässä selvityksessä.

Teollisuuskaasuturbiineja käytetään lähinnä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Koska niiden hyötysuhde on huono (noin 35 %), niitä käytetään sellaisenaan vain vara- ja huipputuotantoon. (www.siemens.fi).



Kuva 18. **Teollisuus kaasuturbiini**, jollaista käytetään mm laivoilla, mutta harvakseltaan. Siemens Gas Turbines (SGT) SGT-500 Industrial Gas Turbine. ([www.siemens.fi](http://www.siemens.fi))

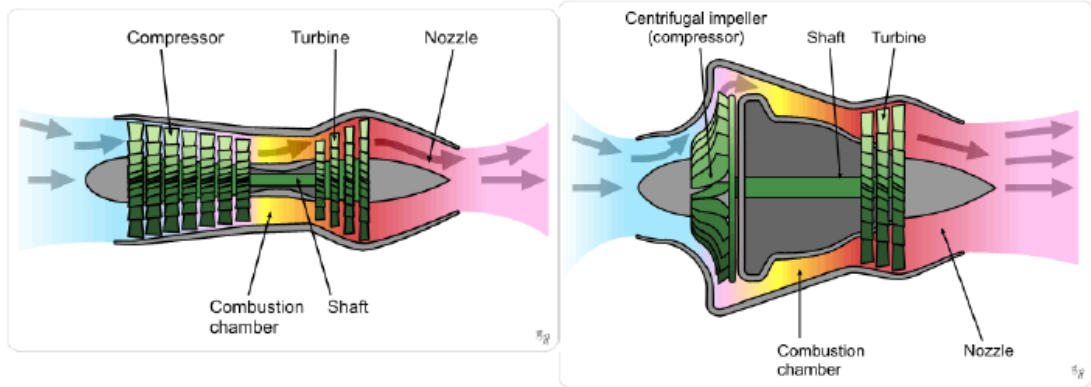
## 2) Lentokonekaasuturbiinit

Lentokonemoottorissa turbiinivyöhykkeen tehtävänä on pyörittää kompressorin ja kuumat savukaasut käytetään työntövoiman tuottamiseen. Nämä turbiinit toimivat pelkästään lentokoneiden voimanlähteinä.

## 3) Lentokonekaasuturbiinipohjaiset teollisuuskaasuturbiinit .

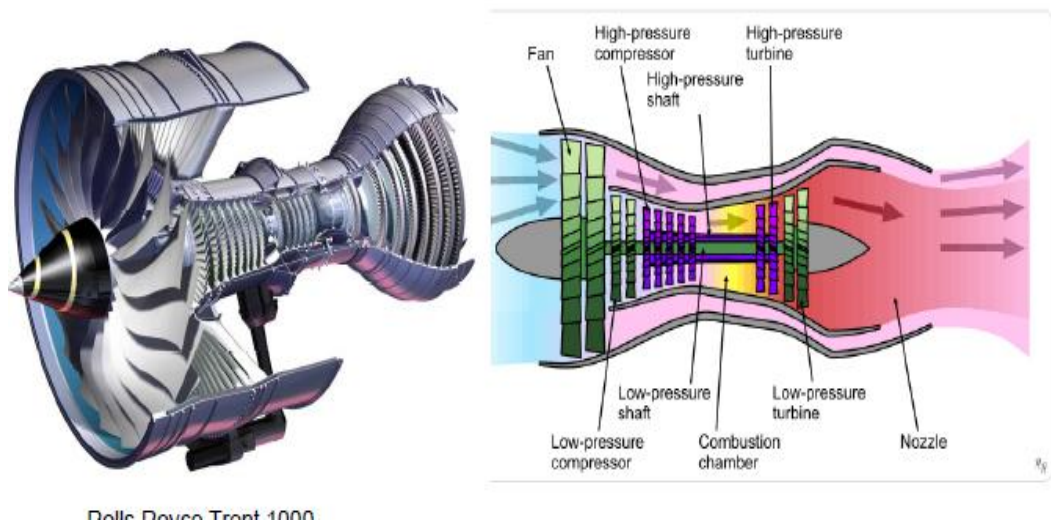
Useimmat lentokonemoottorivalmistajat valmistavat turbiinejaan pienin muutoksin myös sähköntuotantokäyttöön. Näissä ratkaisuissa on lentokonemoottori tyypillisesti ns. kaasugeneraattorina ja sähköntuotanto perustuu erillisellä akselilla olevaan voimaturbiiniin, joka on lisätty kaasugeneraattorin jälkeen hyödyntämään lentokonemoottorin työntövoima. Näiden kaasuturbiinien sähkötehot ovat muutamista megawateista aina noin 50 MW:iin saakka.

Suihkumoottorissa eli turbojetissä suurin osa tehosta otetaan työntövoimana. Useimmiten apulaitteiden voimanotto otetaan jostain moottorin akseleista ja paineilman otto ennen polttokammiota. Näiden apulaitteiden voimienotto ei vaikuta millään lailla turbiinin tuottamaan työntövoimaan. Kyseistä turbojet -tyyppistä suihkumoottoria käytetään pienissä ja yksinkertaisissa lentomoottoreissa. (Häkkinen, P. 2010 Kaasuturbiinit s. 26).



Kuva 19. Turbojet suihkumoottori (Häkkinen, P. 2010 Kaasuturbiinit s. 25).

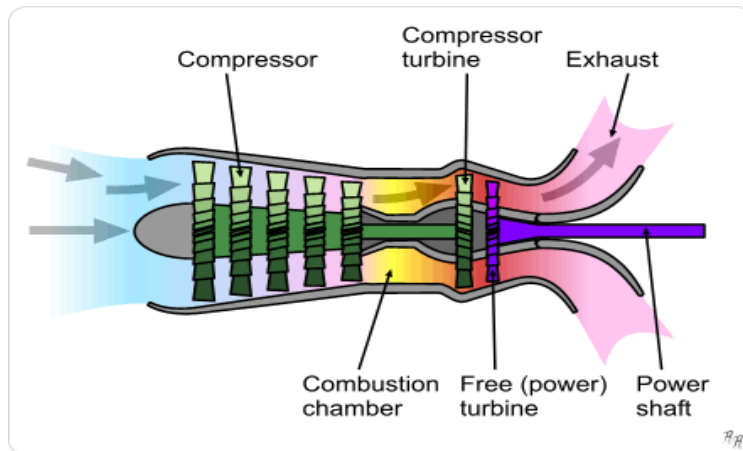
Ohivirtausmoottori on melkein kuin suihkumoottori, paitsi että osa sen läpi virtaavasta ilmasta kulkee polttokammion kautta. Ohivirtausmoottorit jaetaan matalan ja korkean ohivirtaussuhteen moottoreihin (low- ja high-bypass turbofan).



Kuva 20. Ohivirtausmoottori (Häkkinen, P. 2010, Kaasuturbiinit s. 26).

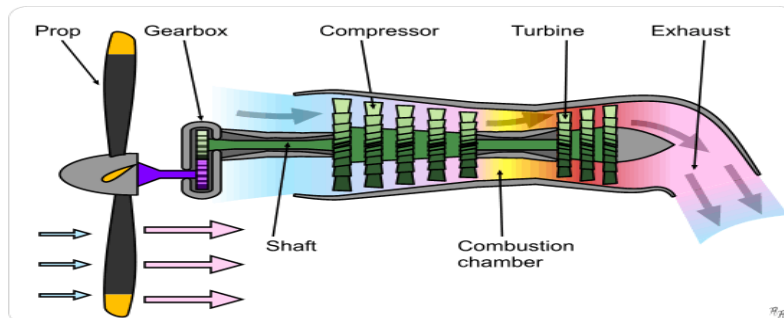
Turbiinimoottori muistuttaa lentoturbiineista eniten maan pinnalla käytettävää. Suurin osa moottorin tehosta otetaan akselitehona. Käytetään mm. helikopterin roottoreiden pyörittämiseen. Helikopterin huippunopeus on matala, joten ilman nopeus moottoriin nähden on myös matala. Poistuva virtaus suunnataan joskus lisäämään työntöä, mutta usein symmetrisesti sivuille hallittavuuden vuoksi.





Kuva 21. Turbiinimoottori, eli turboshaft (Häkkinen, P. 2010, Kaasuturbiinit s. 28).

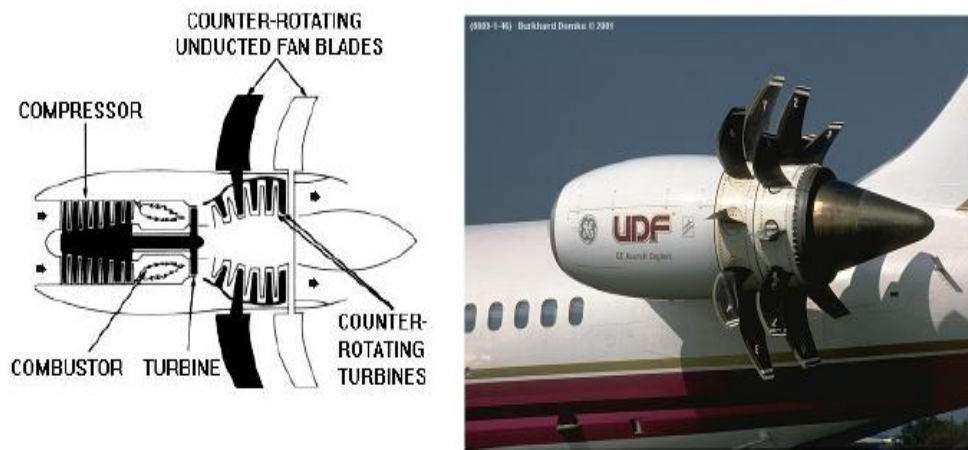
Potkuriturbiini muistuttaa turbiinimoottoria, mutta voima otetaan moottorin yhteyteen asennetulle potkurille, alennusvaihteen kautta. Hyötysuhde on melko hyvä noin nopeuteen 720 km/h:n asti. Käytetään hitaissa lentokoneissa. Moottorin läpi virtaavan kaasun työntöä voidaan hyödyntää turbiinimoottoria paremmin.



Kuva 22. Potkuriturbiini, toiselta nimeltään turboprop (Häkkinen, P. 2010 Kaasuturbiinit s. 29).

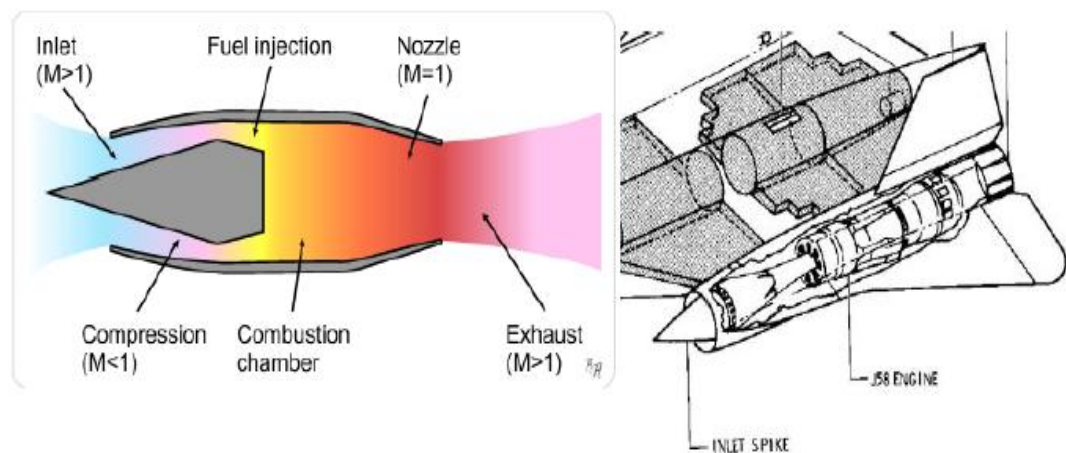
Potkuripuhallinmoottori on potkuriturbiinin ja ohivirtausmoottorin välimuoto. Moottori pyörittää ulkopuolelle sijoitettua siipipyöräparia. Siipipyörät pyörivät eri suuntiin ja selvästi tavallista potkuria nopeammin. Potkuripuhallinmoottori pystyy suurempaan nopeuteen kuin potkuriturbiini, mutta ohivirtausmoottoria taloudellisemmin. Potkuripuhallinmoottori on äänekäs.





Kuva 23. Potkuripuhallinmoottori eli propfan (Häkkinen, P. 2010 Kaasuturbiinit s. 15).

Polttoaineen syötön lisäksi ei liikkuvia osia. Patoputkimoottori ei toimi alle 1000 km/h nopeuksilla. Se voidaan yhdistää toimimaan suihkumoottorin yhteydessä (turbojet assisted ramjet): matalilla nopeuksilla tavallisena suihkumoottorina, mutta suurilla nopeuksilla patoputkimoottori käynnistetään avuksi. Suoritusarvo ylittää suihkumoottorin noin 2,4 Mach nopeudessa. Käytetty Lockheed SR-71-vakoilukoneessa.

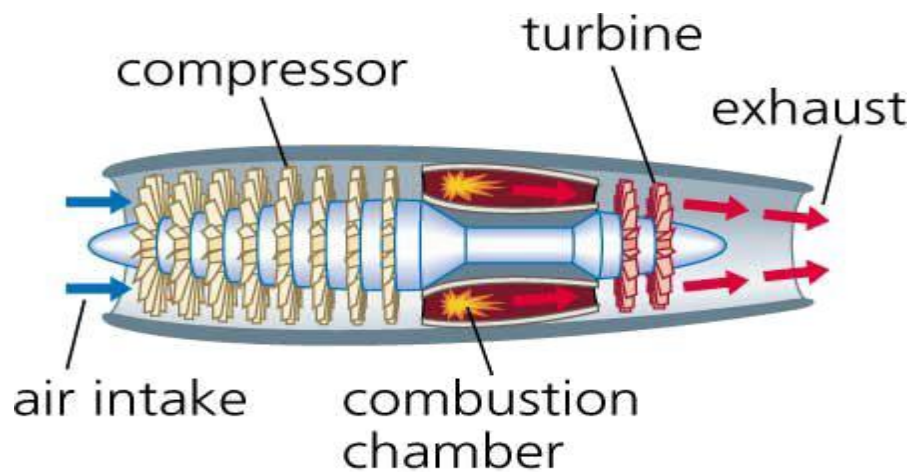


Kuva 24. Patoputkimoottori eli ramjet (Häkkinen, P. 2010 Kaasuturbiinit s. 16).

### 3.3 Kaasuturbiinien toimintateoriaa

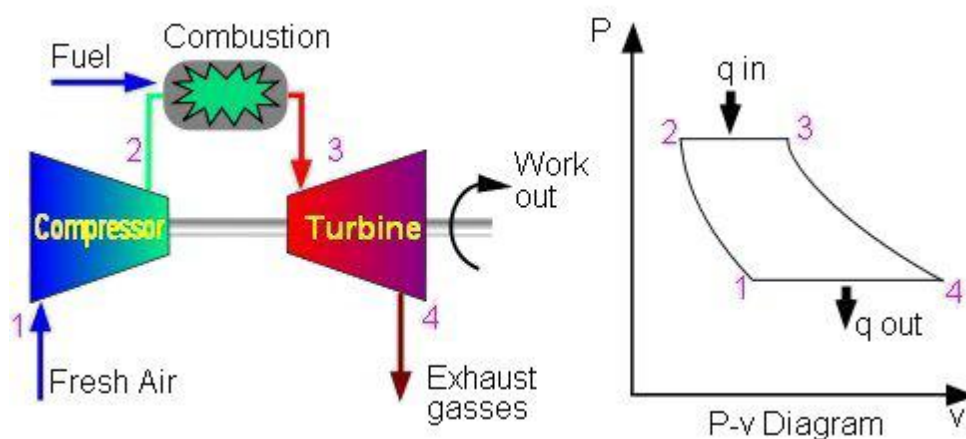
Kaasuturbiinissa kompressori imee ilman ulkoa ja ahtaa sen kaasuturbiiniin, jossa painesuhde on 20 ja pyörimisnopeus on 1000 kierrosta minuutissa. Turbiini pyörittää ak-

selin avulla kompressorin. Joissain uusissa turbiineissa matalapainekompressorin pyörittää matalapaineturbiini, kun taas korkeapainekompressorin pyörittää korkeapaineturbiini, joka tulee polttokammion jälkeen. Voima siirretään sisäkkäisillä aksleilla. Palotila on polttokammio, jossa polttoaine ruiskutetaan ahdetun ilman sekaan. Palaminen tapahtuu palokammiossa jatkuvasti noin 1300 asteessa. Palavat kaasut saapuvat voimaturbiinille 500-asteisina. Voimaturbiinissa on joitakin siivekkyöhykkeitä ja sen pyörimisnopeus on 3000-12 000 kierrosta minuutissa. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 98).



Kuva 25. Kaasuturbiini kokonaisuudessaan sisältää, kompressorin (compressor), polttokammion (combustion chamber) ja turbiinin (turbine) (Häkkinen, P. Turbiinikoneistot. s. 6).

Kaasuturbiinin brayton-työkierto yksinkertaisuudessaan: puristus ja laajentuminen on isentrooppista, kineettisen energian muutokset eivät ole merkittäviä. Moottorissa ei ole myöskään painehäviöitä, sekä virtaava seos ja massavirta pysyvät normaalina. Lämpö siirtyy täydellisesti lämmönvaihtimista.



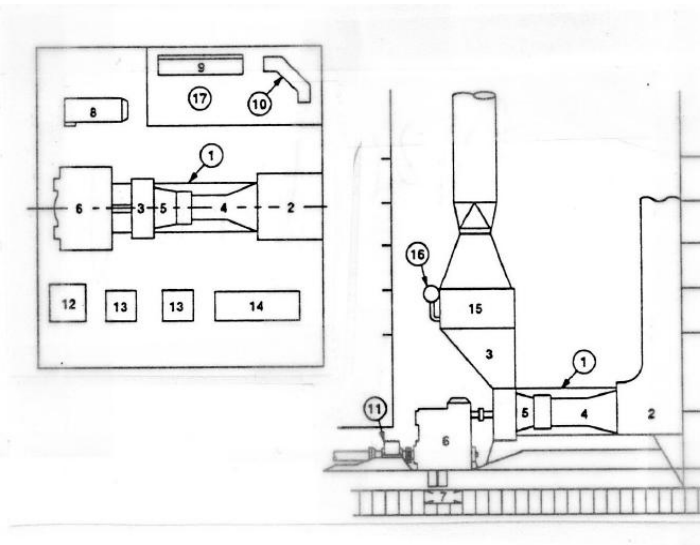
Kuva 26. esittää turbiinin toimintaa, jossa 1. kompressorin imee ja puristaa ilmaa 2. polttoainekammioon, jossa polttoaineen ja ilman palamisesta muodostuu pakokaasuja, jotka johdetaan 3. turbiinin läpi, jolloin turbiinin akselin kautta saadaan turbiinin teho/työ esimerkiksi aluksen potkurin akselille tai generaattorille (Häkkinen, P. Turbiinikoneistot. s. 7).

### 3.4 Kaasuturbiinit laivoilla

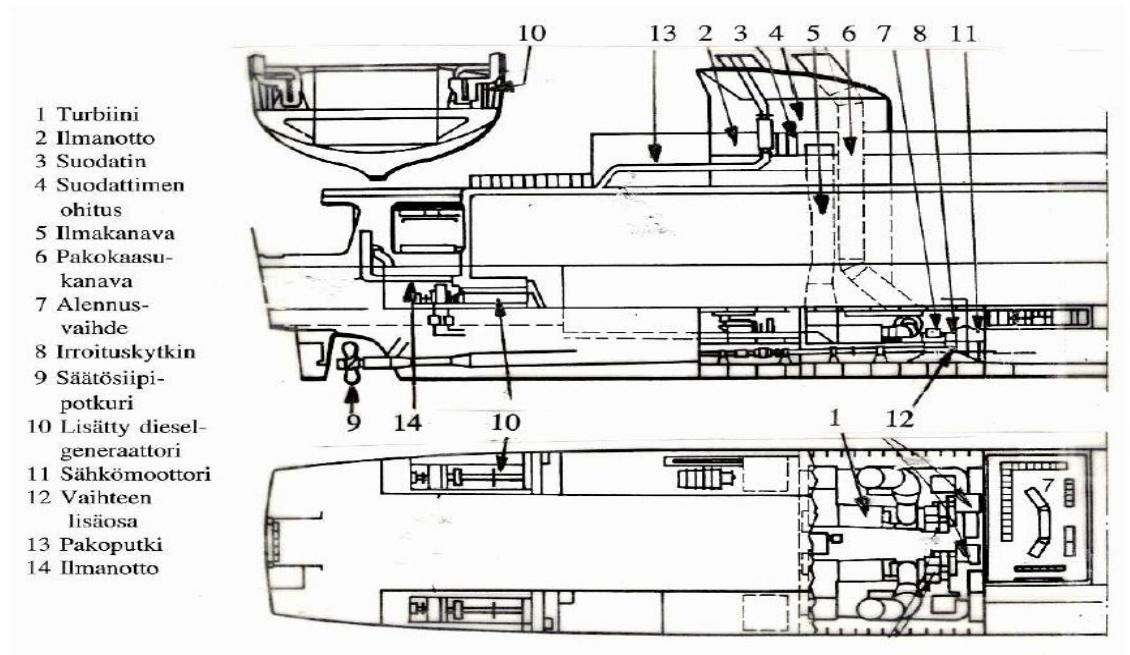
Laivoilla käytetään enimmäkseen moduulissa olevaa kaasuturbiinia, koska se on helppo ratkaisu huollon kannalta. Kun kaasuturbiini vikaantuu, vaihdetaan koko moduuli uuteen ja vanha lähetetään huollettavaksi, kuten GTS Finnjetissä tehtiin. Aviation kaasuturbiineja käytetään laivoilla mieluummin kuin voimalaitoksien kaasuturbiineja, sillä aviation- (lentokone) turbiinit ovat pienempikokoisia ja kevyempiä, eivätkä vie paljoa tilaa konehuoneesta. Ne eivät myöskään vähennä lastikapasiteettia.

Kaasuturbiineja käytetään joissain laivoissa pääkoneena pyörittämään potkuria, apukoneena pyörittämään generaattoria ja tekemään näin sähköä. Niitä käytetään myös kombikoneena pyörittämään potkurin akselia, pakokaasuilla tuotetaan höyryä joka johdetaan höyryturbiiniin, tuottamaan sähköä. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s.98; Finnlines 1977).

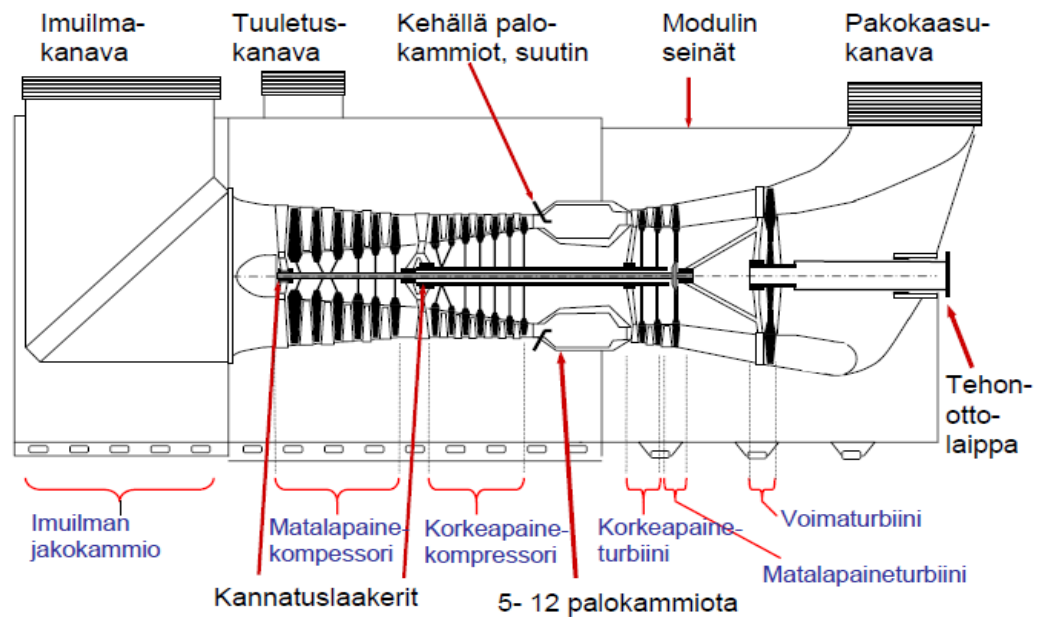
- 1 Kaasuturbiinimoduuli
- 2 Imuilmakanava
- 3 Pakokaasukanava
- 4 Kaasugeneraattori
- 5 Voimaturbiini
- 6 Alennusvaihe
- 7 Voiteluöljytankki
- 8 Turbogeneraattori
- 9 Pääsähkötaulu
- 10 Ohjauspulpetti
- 11 Painelaakeri
- 12 Apukattila
- 13 Makeanveden kehitin
- 14 Dieselgeneraattori
- 15 Pakokaasukattila
- 16 Höyrylieriö
- 17 Valvontahuone



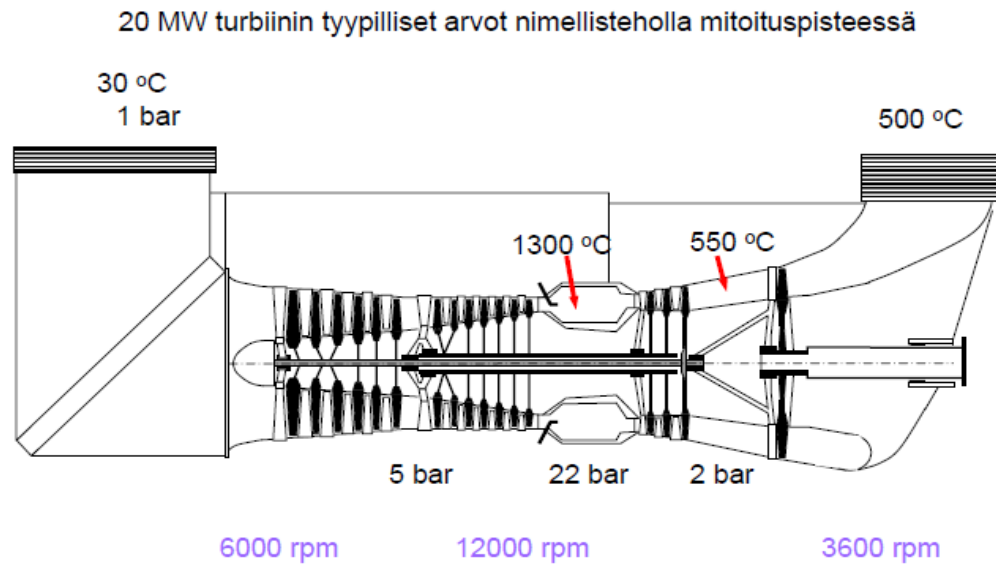
Kuva 27. kaasuturbiinikäyttöisen rahtilaivan konehuone ja sen laitteet (Häkkinen 2007, Laivakoneistot s. 99).



Kuva 28. GTS Finnjetin alkuperäinen kaasuturbiinikoneisto ja mekaaninen voimansiirto sekä lisätty dieselsähköinen koneisto. (Häkkinen 2007 Laivan koneistot s.100 ),



Kuva 29. Aed (aerodynamic) tyyppin kaasuturbiini laivakoneena, moduuliin rakennettu. (Häkkinen 2007 Laivan koneistot s. 99).



Tehokkaiden nykyturbiinien kaasugeneraattoreissa on yleisesti kaksi sisäkkäistä akselia eri käyntinopeuksilla.

Kuva 30. Aed-kaasuturbiinin paineet ja lämpötilat sekä kompressorin ja turbiinien kierrokset (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 18).

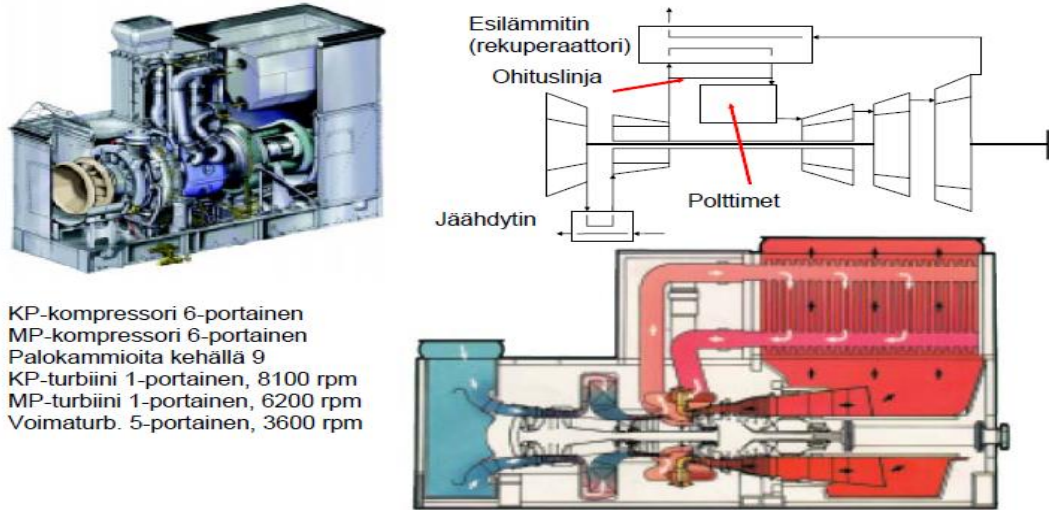
Taulukko 1. Esimerkkejä laivoissa käytetyistä kaasuturbiineista (Häkkinen, P. 2010, Kaasuturbiinit s. 19).

Valmistaja	Eurodyn kehitteillä 'apukoneeksi'	General Electric	General Electric	General Electric – ehdotus!	Rolls Royce – Westingh	Siemens
Tyyppi	Eurodyn	LM1600	LM2500	LM6000	WR21	SGT500
ISO teho MW	2.6	14.9	24.3	42.9	25.2	17.3
Navy teho MW	2.26	12.2	21.4	35.5		16.7
Hyötysuhde	33	35.1	37	42	42	31.4
Painesuhde		22	22			12.5
Voimaturb. nopeus	13000	7000	3600	3600	3600	3450
Pakokaasut °C	480	494	527	465	355	375
Moduulin pit. m	3.3	6.8	8.1	9.8	8200	11.4
Mod. korkeus m	1.3	2.8	3.1	3.2		2.5
Mod. massa kg	2600 sisältää vaihteen	12000	16000	24300		17000 Ei modulia

IRC- kaasuturbiinissa ahtoilmaa jäähdytetään matalapainekompressorin jälkeen vedellä ja korkeapainekompressorin jälkeen pakokaasuilla lämmitetään ilmaa. Tällä tavalla

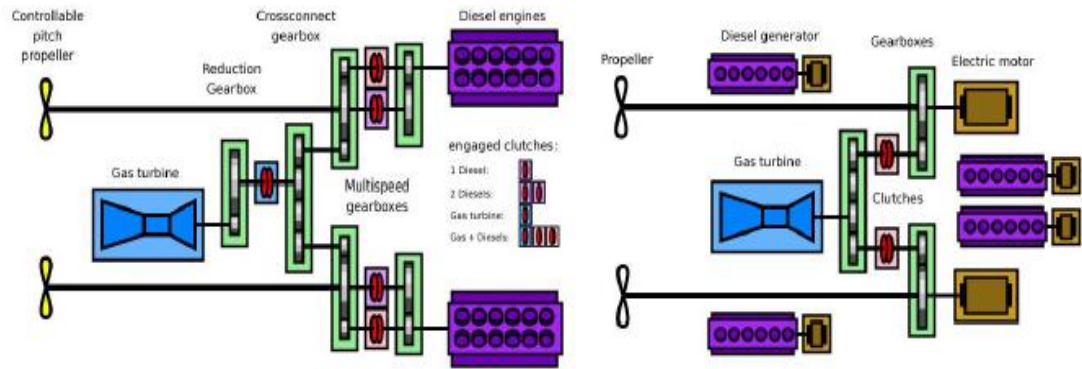


saadaan 30 % korkeampi teho 20 % pienemmällä ominaiskulutuksella verrattuna tavalliseen kaasuturbiiniin. ICR- kaasuturbiinia ei asenneta rahtialuksiin, koska sen pääomakustannukset ovat korkeammat. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 102).



Kuva 31. ICR kaasuturbiini eli Intercooled recuperated kaasuturbiini eli välijäähdytetty- esilämmitetty kaasuturbiini. Käytetään lähinnä sotalaivoissa. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 102).

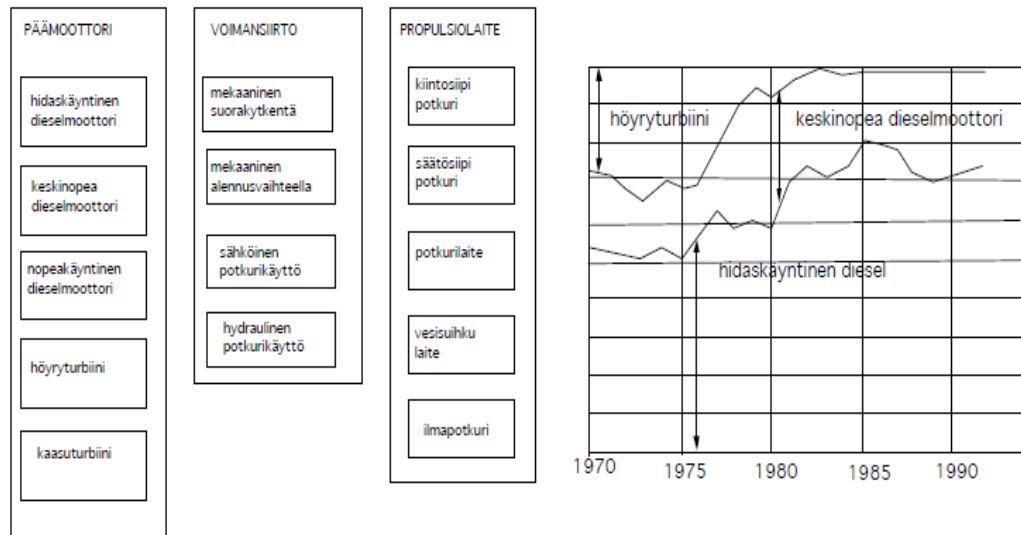
Kaasuturbiiniin heikkoa osakuormitusta laivoissa parannetaan yhdistämällä usea voimanlähde samaan voimansiirtoon, käyttämään voimanlähteitä erikseen tai yhtä aikaa. Nimi lyhennetään esim. CODOG (COMbined Diesel Or Gas turbine) eli yhdistetty dieselkaasuturbiini, OSAG (COMbined Steam And Gas Turbine) eli yhdistetty höyry- ja kaasuturbiini, CODLAG (COMbined Diesel eLectric and Gas turbine) eli yhdistetty sähkömoottori -kaasuturbiini. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 103).



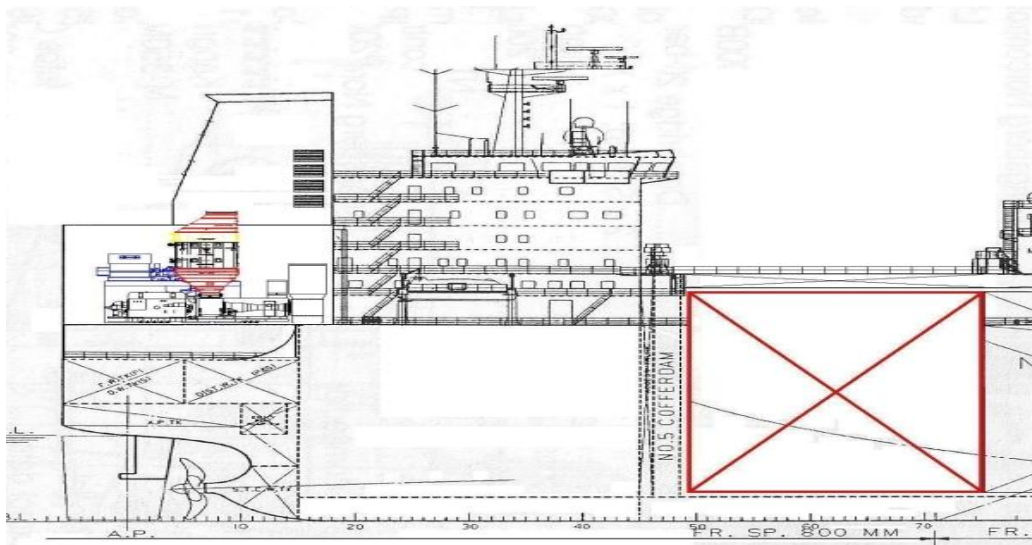
Kuva 32. Laivakäytön yhdistelmäkoneistot (Häkkinen, P. 2010, Kaasuturbiinit s. 22).

Kaasuturbiineja käytetään laivoissa alennusvaihteen avulla kytkettynä, joko kiinteäläpaiseen potkuriin, kuten tykkivene Karjalassa, tai säätösiipiseen potkuriin, kuten Finnjetissä. Myös on mahdollista pyörittää kaasuturbiinilla vesijetin impelleriä alennusvaihteen kautta. Myös kaasuturbiinin kytkentä sähköisesti potkurijärjestelmään on mahdollista. (Finnish Maritime Index 2004-05 s. 263; Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 2; Merisotilaan käsikirja 2001 s. 60-61).

Taulukko 2. Kuljetuskoneistojen vaihtoehdot. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 3).



Kaasuturbiini tuottaa sähkögeneraattorilla virtaa sähkömoottorille, joka pyörittää LNG- kaasutankkerin potkurin akselia. Näin konehuonetilat ovat todella pienet ja lastitilaa on paljon. (Gas Turbine Electric Drive LNG-Carrier)

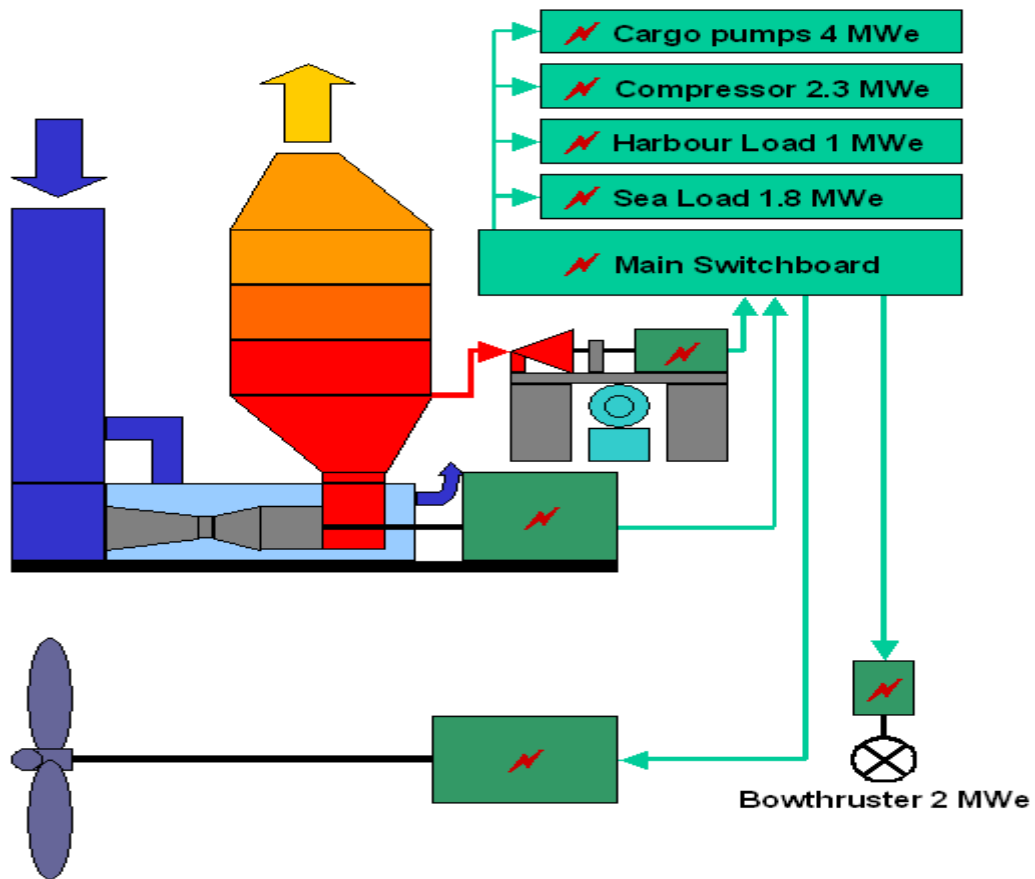


Kuva 33. Kaasuturbiini-sähkö toiminen LNG kaasutankkeri (Gas Turbine Electric Drive LNG-Carrier).

1 x kaksois-polttoaineen käyttävä merikaasuturbiiniversio, jonka generaattorin teho on 27 MW; 1 x höyryturbiinigenaattorilla, teho 10 MW; 1 x pakokaasukattila lisäpoltolla ja kanava poltolla ; 1 x Taajuusohjattu sähkömoottori; 1 x FPP.



Vapaa tehoturbiini kaasuturbiinissa käyttää generaattoria. Generaattori tuottaa sähköä pääkytkintaululle. Pääsähkötaulu syöttää kaikki sähköt kuluttajille. Potkurin ohjataan taajuusohjatulla sähkömoottorilla. Kaasuturbiinin pakokaasuista tuotetaan höyryä pakokaasukattilassa. Tämä höyry käytetään tuottamaan 10 MW teho höyryturbiinigeneraattorilla. Höyryturbiinigeneraattorilla syötetään myös sähköä pääkytkintauluun.



Kuva 34. Kaasuturbiini sähkökäyttö yhdistettynä propulsioon (potkurin pyörittämiseen sähköisesti). (Gas Turbine Electric Drive LNG-Carrier).

### 3.5 Kaasuturbiinin vertailua muihin koneisiin ja höyryturbiiniin

#### 3.5.1 Kaasuturbiinien kulutuksen vertailu

Taulukko 3. kulutuksien vertailu.

Kone	Polttoaineen kulutus
Finnjet Pratt&Whitney FT4C-1 DLF turbiini	290 - 300 g /kWh 3)
Finnjetin päädieselit (kpl)	197 – 203 g / kWh 3)
Finnjetin apukoneet (kpl)	205 – 213 g / kWh 3)
Finnjetin höyrykattilat ( kpl)	100 – 480 kg / h 3)
Keskinopeat dieselit	165 – 185 g / kWh 1)
Wärtsilä 32	184 – 194 g / kWh 2)
Wärtsilä 46	173 g / kWh 2)
Wärtsilä 6L64	164 g /kWh 2)
Höyryturbiini SAH kierto	270 – 290 g /kWh 1)
Höyryturbiini välitulistus ja paineennosto	240 – 260 g / kWh 1)

1) Häkkinen 2007, Laivan koneistot s.52, 92

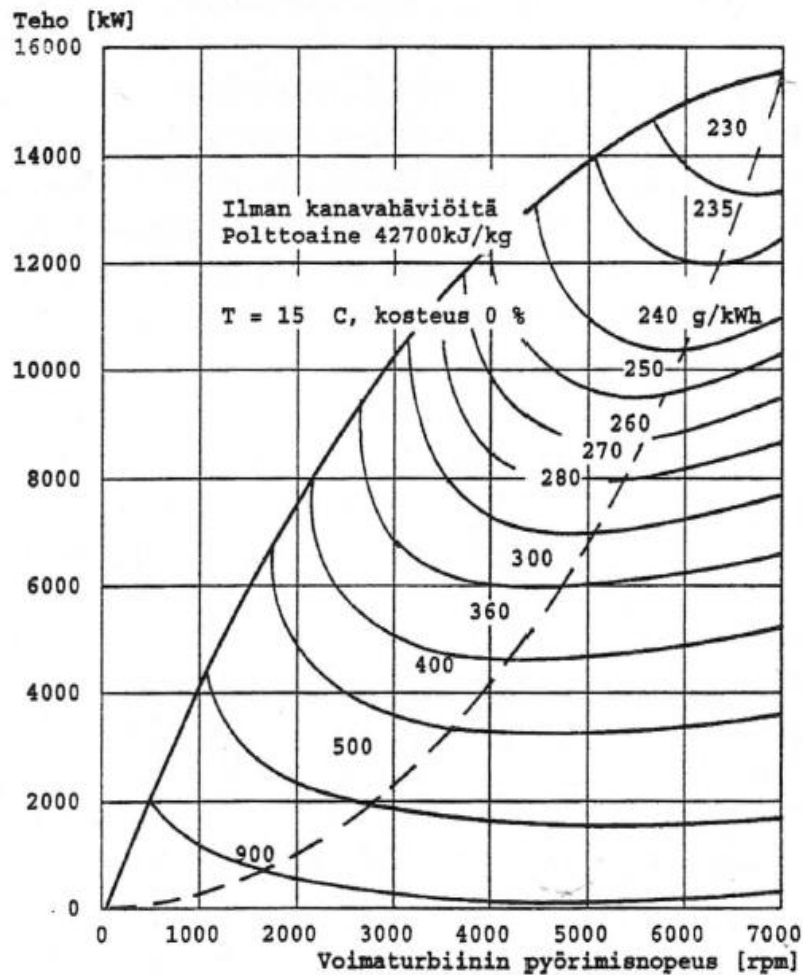
2) www.Wärtsilä.fi

3) Port of Helsinki authority telefax message, to Silja Line ATTN Henrik Hellman, to GTS Finnjet konepäällikkö A.J Wikström

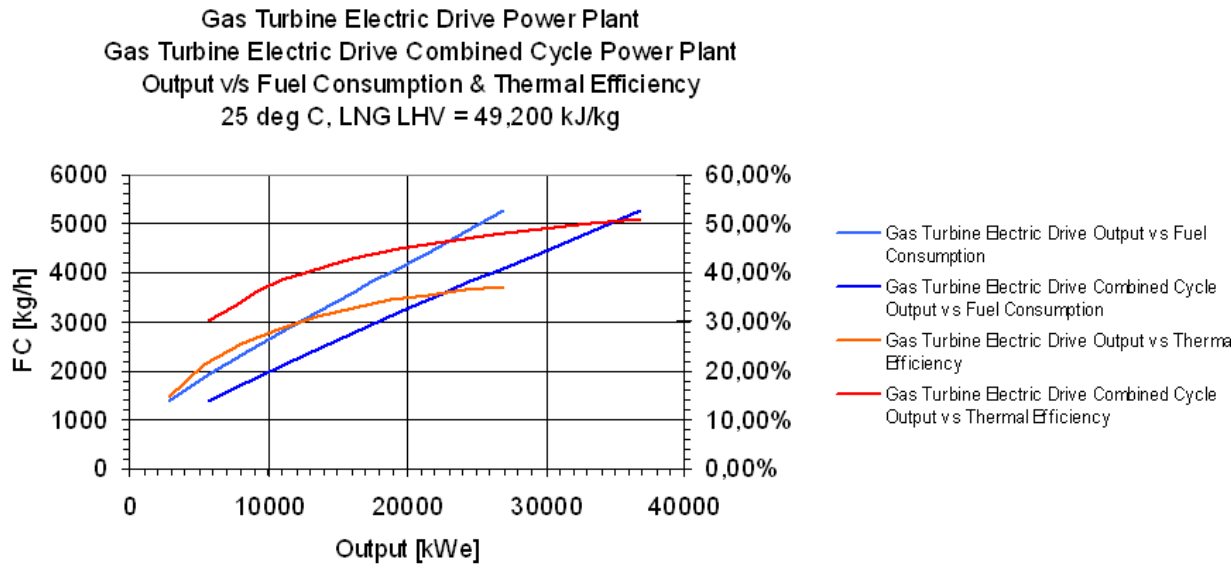
Rustonin nopeakäyntiset meridieselit 4kpl kuluttivat Superseacat 1:llä 94,44 litraa/minuutissa dieseliä.

Mitä suurempi diesel kone on sitä pienempi polttoaineen kulutus. Sama koskee myös kaasuturbiiniakin (g / kWh).

Alla olevasta kuvasta käy ilmi, että mitä suurempi kaasuturbiini, sitä pienempi sen polttoainekulutus on g / kWh.



Kuva 35. kaasuturbiinin kuormitusalue ja polttoaineen ominaiskulutus. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 101).



Kuva 36. Kuten voidaan nähdä polttoaineen kulutuksen ja termien hyötysuhde kaaviosta, lämpöhyötysuhde kaasuturbiinin sähkökäytössä ylittää 50 % yhdistetyssä sähkön tuotannossa toiminnassa. Käyttöolosuhteissa, termien hyötysuhde on noin 48 % (Gas Turbine Electric Drive, LNG- Carrier).

Taulukko 4. LNG- kaasutankkerin kaasuturbiinin polttoainetalous kaavio. (Gas Turbine Electric Drive, LNG- Carrier).

Basic Data for Machinery	
Boiler and Steam Turbine	
Specific fuel oil consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)	290.0 g/kWh
Specific energy consumption	12,383 kJ/kWh
Specific maintenance costs	0.0 US\$/MWh
Diesel Engines	
Typical data MAN B&W two-stroke MC/MC-C engine	
Specific fuel oil consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)	169.0 g/kWh
Specific energy consumption	7216 kJ/kWh
Specific cylinder L.O. consumption	1.5 g/kWh
System oil consumption	80.0 kg/24h
Specific maintenance costs	1.0 US\$/MWh
Typical data for small MAN B&W four-stroke HFO Gensets	
Specific fuel oil consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)	190.0 g/kWh
Specific L.O. consumption	1.0 g/kWh
Specific maintenance costs	2.5 US\$/MWh

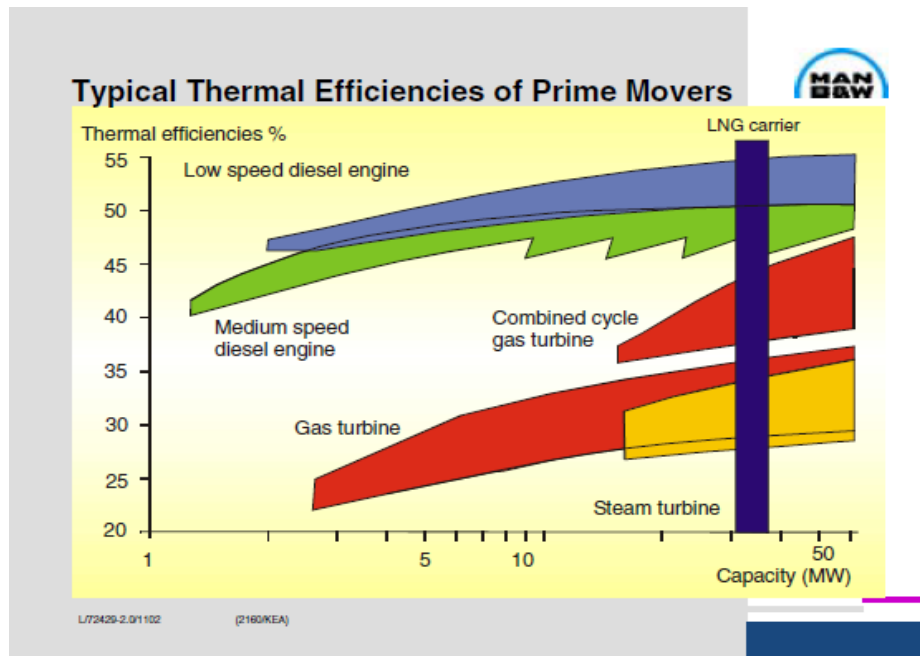


Fig. 1: Typical thermal efficiencies of prime movers

Kuva 37. Vertailu LNG-nestemäisen luonnonkaasun kuljetukseen tarkoitettujen tankkerien pääkoneista. LNG carrier propulsion by ME engines and refriquesfaction (MAN B & W).

### 3.5.2 Kaasuturbiinit voimalaitoksissa

Mitä luultavimmin dieselkoneet kuluttavat voimalaitoksilla noin 205-213 g/ kWh sähköä tuottaessa riippuen koneen koosta ja käyntinopeudesta. (Huhtinen ym. 2008 Voimalaitostekniikka s. 181 ).

Vanajan kaasuturbiinilaitoksen kaasuturbiini kuluttaa polttoainetta vuodessa 90-180 tonnia, kun käyttöajat ovat 5-10 h/vuosi, jolloin energiaa on tehty 250-500 MWh/vuosi. (Energiamarkkinaviraston päätös Dnro 279/311/2004 17.11.2004).

Höyryturbiini taas kuluttaa esimerkiksi leijupetipoltolla, sekä korkeimmilla höyrynarvoilla ja välitulistuksella 60 MW:n teholla 230 g/kWh (Häkkinen 2007, Laivan koneistot, s.92).

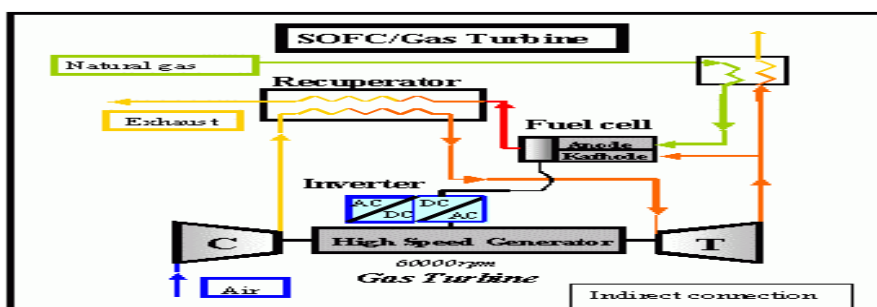
### 3.5.3 Lämmöntalteenotto kaasuturbiinikäytössä

Kaasuturbiinin sisäänmenolämpötila on noin 1250 astetta ja savukaasun, joka tulee kaasuturbiinista on noin 500-550 astetta. Kaasuturbiinin savukaasut sisältävät 12 prosenttia happea. Voimalaitoksen sähköntuotantoa voidaan myös kasvattaa lisäämällä kaasuturbiinin perään höyryturbiini. Kaasuturbiinin ja höyryturbiinin yhdistelmää kutsutaan kombivoimalaitokseksi.

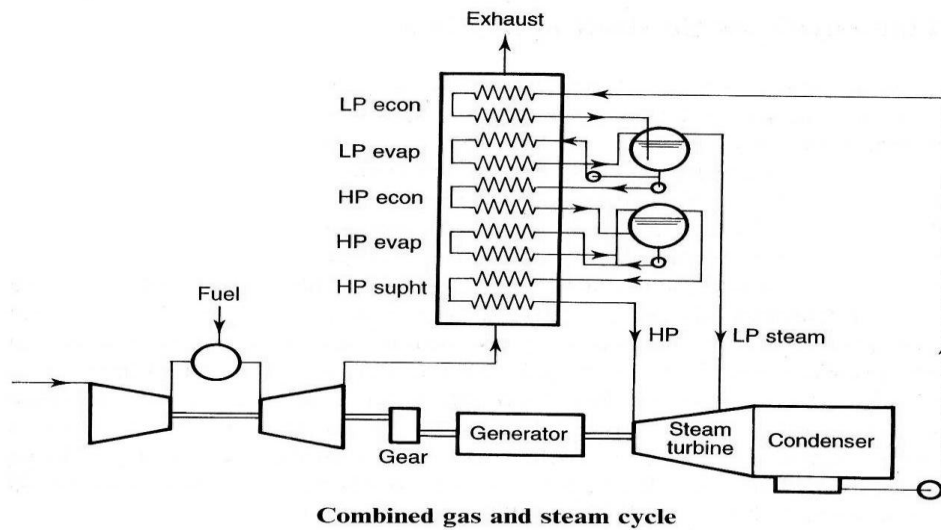
Savukaasujen sisältämä lämpö siirretään höyryyn lämmön talteenottokattilassa. Lisäksi savukaasujen korkea happipitoisuus hyödynnetään lisäpoltossa. Lisäpoltto ei ole sähköntuotannon hyötysuhteen kasvattamisen kannalta kovinkaan tuottoisaa. Kombivoimalaitosratkaisun käyttö lämmön ja sähkön yhteistuotannossa kasvattaa hyötysuhdetta todella paljon.

Sähköntuotannossa kaasuturbiinin hyötysuhde on noin 25-37 prosenttia. Osakuormilla hyötysuhde laskee vauhdilla. Kun höyryturbiini lisätään tähän järjestelmään, hyötysuhde nousee jopa 58 prosenttiin. Kun taas lauhdevoimalaitoksilla hyötysuhde on maksimissaan hiukan yli 40 prosenttia. (Huhtinen ym. 2008, Voimalaitostekniikka s. 204-211).

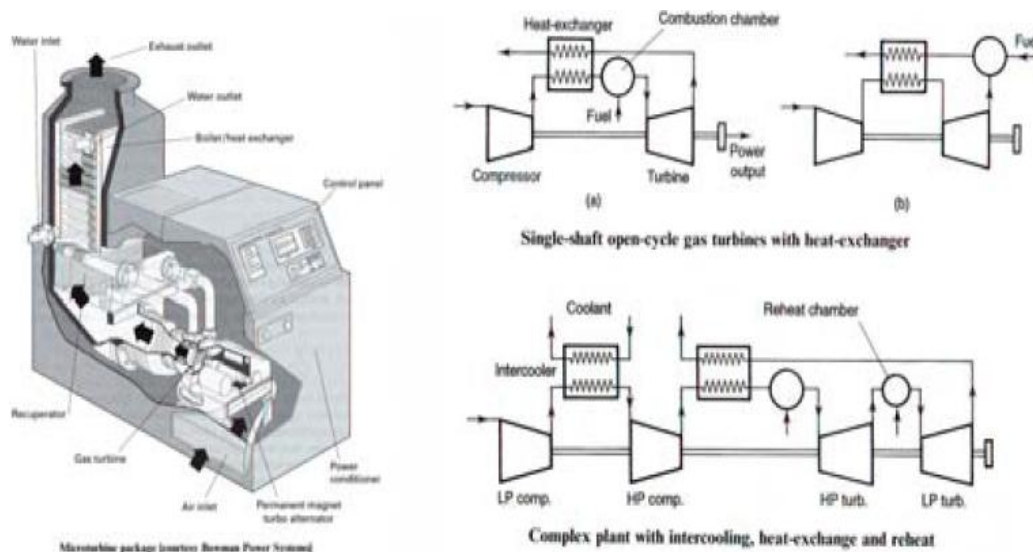
Kaasuturbiinin savukaasusta kerätään energiat lämmöntalteenottokattilassa (heat recovery steam generator, HRSG). Höyry useimmiten käyttää turbiinia. Tällaista laitosta kutsutaan yhteistuotantolaitokseksi (cogeneration, combined heat and power, CHP). LTO- kattilaan voidaan lisätä jälkipolttokammio, joka käyttää halvempaa polttoainetta kuin itse kaasuturbiini, joka ei siedä epäpuhtauksia polttoaineessa. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 102).



Kuva 38. Kaasuturbiinin pakokaasun lämmöntalteenotto. (Wikipedia)



Kuva 39. Yhdistetty kaasuturbiinin ja höyryturbiinin kierto. Kaasuturbiinin pakokaasuilla tuotetaan höyryä höyryturbiinille ja näin tuotetaan sähköä ja lämpöä. Häkkinen, P. 2010, Kaasuturbiinit s.9).



Kuva 40. Voimalaitoskaasuturbiinin lämmöntalteenottoa ja kierrätystä.

Teollisuuskaasuturbiinit on mitoitettu kombi- ja kaasukombivoimalaitoskäyttöä silmällä pitäen suuriin voimalaitoksiin eikä niitä käsitellä tässä selvityksessä. (Häkkinen, P. Turbiinikoneistot s. 18).

Marin diesel oil, diesel, polttoöljy, kevytpolttoöljy, seospolttoöljy (23 %kevytpolttoöljyä ja 77 % raskasta polttoöljyä), kerosiini, jet. Laivoilla käytetään lähinnä polttoaineena seospolttoöljyä, dieseliä ja polttoöljyä.

Kaasuturbiinista tulee päästöinä rikkipäästöjä ja hiilidioksidipäästöjä pakokaasuista, ellei ole pakokaasupesuria (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 101).

## 4 YHTEENVETO HÖYRY- JA KAASUTURBIINEISTA

### 4.1 Höyryturbiinit

Höyryturbiinin käyttö nykyaikana on taas ajankohtaista, koska Koillisväylällä tarvitaan murtajia ja rahtialuksia, joilla on tehoa murtaa jäätä sekä kuljettaa rahtia. Venäläiset käyttävät hyväkseen jäänmurtajissaan ydinvoimaa, joka on halpaa ja josta riittää polttoainetta viideksi vuodeksi kerrallaan. Samoin Venäjän jäämerenlaivastolla on ydinkäyttöisiä sukellusveneitä. Niissä kuten murtajissakin ydinvoimalla tuotetaan höyryä höyryturbiineille. (Tieteen kuvalehti nro 16/2012 s. 38; Turunen & Partanen 2011, Raakaa voimaa, s. 98.)

On myös aluksia, joissa dieselkoneiden pakokaasujen lämmöstä kehitetään höyryä. Höyry puolestaan pyörittää turbogeneraattoria, joka tuottaa alukselle sähköä. Turbogeneraattoriratkaisu on kallis, ja sen vuoksi on harkittava tarkkaan, tuottaako aluksella sähköä apudieseleillä tai akseligeneraattorilla vai turbogeneraattorilla. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 132.)

Nykyään on myös ratkaisuja, joissa kaasuturbiinin pakokaasuilla kehitetään höyryä höyryturbiinille ja siten käytetään kumpaakin turbiinia, joista toinen pyörittää potkuria ja toinen kehittää sähköä. Tämän kaltaisella kombiratkaisulla on parempi hyötysuhde kuin jommallakummalla turbiinilla erikseen. Nykyajan polttoainehinnoilla voi höyryturbiini tulla kyseeseen, jos sitä käytetään yhdistelmänä (kombina) diesel- tai kaasuturbiinin kanssa. Höyryturbiinia voidaan käyttää myös muilla polttoaineilla kuin raskaalla polttoaineella. Näitä ovat kaasu, biopolttoaine, hiili, jäte, turve tai ydinenergia. Myös aurinkoenergia on nykyään mahdollista. (Häkkinen 2007, Laivan koneistot s. 103; Huhtinen ym. 2008, Voimalaitostekniikka s. 227.)



## 4.2 Kaasuturbiinit

Kaasuturbiini on helppo ja kätevä propulsiokoneeksi, sähköntuottokoneeksi tai kombikoneeksi laivalle. Se on kevyt, suhteellisen pieni ja mahtuu konehuoneeseen. Sen vääntö riittää kulutuksen kasvusta huolimatta. Se on myös yksinkertainen ja helppo-hoitoinen, sekä se voidaan helposti korvata uudella. Ainoita syitä, miksi kaasuturbiinia ei juuri käytetä muissa laivoissa kuin sota-aluksissa ja joissain erikoisnopeissa aluksissa, on polttoaineen korkea hinta. Kaasuturbiini polttaa nopeasti polttoainetta, joten se on suurikulutuksinen. Lisäksi kaasuturbiinilla on huonompi hyötysuhde kuin dieselkoneilla ja höyryturbiinilla. Jos polttoaineen hinta laskisi ja tulisi jälleen tarvetta nopeille matkustaja- ja rahtialuksille, voisi kaasuturbiini olla hyvä vaihtoehto. Nykyään löytyy jo pienempikulutuksisia kaasuturbiineja, joissa polttoaineen kulutus lähestyy dieselkoneen kulutusta. Tulevaisuudessa kaasuturbiinit voivat olla melko yleisiä laivoilla. (Häkkinen ,2007, Laivan koneistot s. 100-103.)

GTS Finnjetillä käytettiin aluksi kaasuturbiineja pääkoneina, mutta lopulta polttoaineen hinnan vuoksi hankittiin lisäksi dieselit pääkoneiksi. Näitä voitiin yhdistellä kaasuturbiinien kanssa akseleille niin, että toista akselia pyöritti kaasuturbiini ja toista dieselkone. (Finnjet airways flightforum.)

## LÄHTEET

Energiamarkkinaviraston päätös Dnro 279/311/2004 17.11.2004 hakija Fingrid Varavoima Oy

Finnish maritime index 2004-05

Finnjet airways-flightforum.fi. Saatavissa: [www.flightforum.fi/forum/index.php](http://www.flightforum.fi/forum/index.php)

Finnjet- pikamatka hyvissä käsissä 1977. Finnlines, Hämeen Kirjapaino Oy

Gas Turbine Electric Drive LNG- Carrier.  
Saatavissa: [www.mptconsult.com/LNGC%20GTG.html](http://www.mptconsult.com/LNGC%20GTG.html)

Huhtinen, M. Korhonen, R. Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka, Edita

Häkkinen, P. Turbiinikoneistot. Kurssimateriaali. Teknillinen korkeakoulu. Saatavissa: [http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.3400/POJ\\_luku\\_5.pdf](http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.3400/POJ_luku_5.pdf)

Häkkinen, P. 2007. Laivan koneistot. Teknillinen korkeakoulu, Laivalaboratorio

Häkkinen, P. 2010 (Kaasuturbiinit)

Höyryturbiinit, [www.wikipedia.org/wiki/Höyryturbiini](http://www.wikipedia.org/wiki/Höyryturbiini)

Kaasuturbiinit, [fi.wikipedia.org/wiki/kaasuturbiini](http://fi.wikipedia.org/wiki/kaasuturbiini)

LNG carrier propulsion by ME engines and refriuefaction (MAN B&W)

Merisotilaan käsikirja, 2001. Merivoimat, puolustusvoimat 2001

Port of Helsinki authority telefax message, to Silja Line ATTN Henrik Hellman, to GTS Finnjet, konepäällikkö A. J. Wikström

Tieteen Kuvalehti nro 16/2012. Henrik Bendix, Murtaajat avaavat jäämeren

Turunen, A. & Partanen, P. 2011. Raakaa voimaa, suomalaisen jäänmurtamisen tarina. Jyväskylä: Atena

Wikipedia

The Ux Consulting Company: ([www.uxc.com/smr/uxc\\_SMRDetail.aspx?key=RITM-200](http://www.uxc.com/smr/uxc_SMRDetail.aspx?key=RITM-200))

[www.emma-maersk.com/engine/wartsila\\_sulzer\\_RTA%-c.html](http://www.emma-maersk.com/engine/wartsila_sulzer_RTA%-c.html)

[www.siemens.fi](http://www.siemens.fi)

[www.thegreenenergrass.org/2008/01/interwiev](http://www.thegreenenergrass.org/2008/01/interwiev)

[www.mptconsult.com/LNGC%20GTG.htm](http://www.mptconsult.com/LNGC%20GTG.htm)

[www.wartsila.fi](http://www.wartsila.fi)

[www.idmeb.org/contents/Resource/LNG\\_Propulsion\\_02\\_29\\_38.pdf](http://www.idmeb.org/contents/Resource/LNG_Propulsion_02_29_38.pdf)

[www.flightforum.fi/forum/index.php](http://www.flightforum.fi/forum/index.php)